



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA DE MEDIDAS Y ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA DE LAVADO Y VAPOR EN PLANTA DE PRODUCCIÓN DE QUÍMICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

FRANCO ESTEBAN HONTAVILLA BUSTOS

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS COMISIÓN:
J. CRISTIAN SALGADO HERRERA
IGNACIO ESTEBAN ZAPATA PERROT

SANTIAGO DE CHILE
2018

DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA DE MEDIDAS Y ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA DE LAVADO Y VAPOR EN PLANTA DE PRODUCCIÓN DE QUÍMICOS

El cambio climático, problema que ha comenzado a sucitarse desde mediados del siglo XX, en uno de los desafíos tecnológicos y ambientales más importantes para la sociedad. Además de variaciones en la temperatura, precipitaciones y nivel del mar, esta problemática tiene asociados otros riesgos para los ecosistemas, como la falta de disponibilidad de agua dulce para la vida, escasez de alimentos y eventos climáticos extremos como sequías e inundaciones. La industria, al realizar un uso intensivo de recursos críticos como el agua, debe aportar a la adaptación al cambio climático mediante la mejora en sus procesos productivos y la educación en el uso responsable y eficiente de los recursos, para minimizar los perjuicios en el entorno en el que están produciendo.

La empresa en estudio declara que es consciente de la importancia de la sustentabilidad, y la eligió como uno de sus pilares estratégicos. Para ello, estableció una serie de metas ambientales, dentro de las que se encuentran la disminución del 30% en el consumo de energía y emisiones de CO₂, y una disminución del 35% en la utilización de agua.

El objetivo de este trabajo es evaluar técnicamente alternativas de estrategias de reducción de consumo de agua de lavado y vapor de agua del proceso. Esto genera impactos como la disminución de residuos asociados a estos insumos, menor gasto energético y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, uno de los responsables del cambio climático. Para esto se utilizó la metodología Seis Sigma, que mediante mediciones y análisis de datos apunta a la mejora continua de los procesos.

El proceso productivo tiene fundamentalmente un equipo, el reactor. En este equipo se realiza un proceso batch, en que se fabrican diversos productos, dependiendo de las condiciones de operación, la naturaleza del producto, el mecanismo de reacción y el material del reactor que se está utilizando.

Mediante el análisis de los datos obtenidos en el período en estudio, se proponen 8 medidas en que se pretende cambios en el registro de datos y en el establecimiento de metas de consumo semanales, de la inclusión de equipos de medición de flujos asociados a los insumos estudiados y la revisión de los procedimientos de limpieza, con énfasis en la mejora continua de estos. Para una implementación cabal de las medidas, es requerido un análisis económico de las medidas, ya que no se incluye en este estudio.

También se incluyen medidas que son base para una estrategia de futuros cambios a implementar. La estrategia propuesta consta de 5 pilares para la consecución de los objetivos ambientales impuestos: registro de lavados y consumos, la estandarización de los procesos que involucran los insumos en estudio, auditorías constantes para revisión de los estándares, el control y establecimiento de metas de reducción intermedias, y la ejecución de acciones concretas utilizando toda la información disponible.

*“El pájaro rompe el cascarón. El cascarón es el mundo.
Quien quiera nacer tiene que destruir un mundo.”*

Agradecimientos

Todos necesitamos personas que nos guíen, nos acompañen, nos entiendan, corrijan y contengan. Que estén con nosotros sin ninguna razón aparente. Que nos amen. Que nos digan la palabra precisa en el momento indicado. Que callen y que observen. Que opinen y aconsejen. Que nos enseñen. Que nos eduquen. Que nos sientan.

Agradezco conocer a personas que me han transmitido todo lo que alguien necesita. A mi familia con su apoyo incondicional a lo largo del tiempo, a pesar de que muchas veces piensen que estoy loco. A mis amigos, por su compañía, amor y preocupación. A mis alumnos del Proyecto AEI, parte del cumplimiento de uno de mis mayores sueños y responsables de este proceso de paso que estoy viviendo. A los profesores que contribuyeron en mi formación: desde las tías del jardín hasta aquellos que me apoyaron y alentaron a seguir en estos años en la escuela.

A todos quienes creen en que en la vida deben perseguirse los sueños, por poco común que sea. No vivimos de lo que dice o pueda decir el resto.

A quienes piensan que en esta vida se debe amar y servir; poner al servicio las capacidades para mejorar la vida de las personas y ayudarlas a cumplir sus propios sueños, porque son tan importantes como los propios.

A los revolucionarios que rompen el cascarón y crean nuevos mundos.

A quienes ya no están.

A quienes son parte de este sueño.

Todos ustedes son parte de mí, y yo parte de ustedes.

Tabla de contenido

.....	i
Agradecimientos	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	vii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.1.1. Contexto global.....	1
1.1.2. Contexto local	3
1.1.3. Clariant®.....	3
1.1.4. Sustentabilidad en la empresa.....	3
1.1.5. Agua.....	4
1.1.6. Residuos.....	4
1.1.7. Manejo de residuos.....	5
1.2. Descripción del proyecto	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Alcances	6
2. Marco teórico	7
2.1. Método Seis-Sigma	7
2.1.1. Definir	8
2.1.2. Medir	8
2.1.3. Analizar	9
2.1.4. Mejorar.....	9
2.1.5. Controlar	9
2.2. Reacciones de combustión	9
2.3. Caldera	10
2.3.1. Eficiencia de caldera.....	11
3. Metodología	12
3.1. Aplicación método Seis-Sigma	12
3.1.1. Definir	12
3.1.2. Medir	12
3.1.3. Analizar	12
3.1.4. Mejorar.....	13
3.1.5. Controlar	13
3.2. Método de análisis de causa raíz	13
3.2.1. Diagrama de Ishikawa [26].....	13
.....	14
3.3. Cálculo de emisiones de dióxido de carbono	14
4. Resultados: Aplicación del método Seis-Sigma	15
4.1. Definir	15
4.1.1. Proceso productivo.....	15
4.1.2. Elección de los insumos a estudiar y metas.....	16
4.1.3. Uso de agua en la planta	18
4.1.4. Procesos de lavado	19
4.1.5. Uso de vapor en la planta.....	20

4.2. Medir	21
4.2.1. Consumo actual de agua de lavado	21
4.2.2. Consumo actual de vapor de agua	22
4.2.3. Emisiones de CO ₂	24
4.2.4. Energía	25
4.2.5. Avance actual del mejoramiento del desempeño medioambiental	26
4.3. Analizar	27
4.3.1. Agua de lavado	27
4.3.2. Vapor de agua, energía y emisiones de CO ₂	30
4.4. Mejorar	32
4.4.1. Medidas para la reducción del consumo de agua de lavado	32
4.4.2. Medidas para reducción del consumo de vapor, consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono	33
4.4.3. Resumen medidas	34
4.5. Controlar	1
4.5.1. Agua de lavado	1
4.5.2. Vapor	4
4.6. Medidas implementadas	5
4.7. Calendario de implementación	6
5. Discusiones y recomendaciones	7
6. Conclusiones	8
7. Bibliografía	10
8. Anexos	13
Anexo A: mediciones anteriores y metas del 2013.	13
Anexo B: datos de medición de agua	16
i. Agua desmineralizada	16
ii. Agua dura	17
iii. Agua total utilizada en lavado	18
Anexo C: datos de medición de vapor de agua	21
Anexo D: cálculo de las estimaciones del uso de vapor	23
Anexo E: Cálculo de emisiones de dióxido de carbono	25
Anexo F: información de la caldera	26
i. Eficiencia caldera	26
ii. Consumo de gas natural	27
Anexo G: cálculo de energía	28
Anexo H: lista de procesos de limpieza a estandarizar	30
Anexo I: documento de registro de procedimientos de limpieza de reactores	32
Anexo J: propuesta de documento de auditoria a procedimientos de limpieza	33
Anexo K: matrices para limpieza de reactores	34
Anexo L: método de estimación de consumo semanal de agua dura de lavado	38
Anexo M: prueba de estimaciones de metas de consumo de agua de lavado	41
Anexo N: composición del aire	44

Índice de Figuras

Figura 1: Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. [1]	1
Figura 2: Variación del nivel del mar [1]	1
Figura 3: Promedio anual y decenal de la temperatura promedio de la Tierra. [1]	2
Figura 4: Sello Ecotain®, compromiso de la empresa con la sustentabilidad. [8]	4
Figura 5: Orden jerarquizado de preferencia en el manejo de residuos. [11]	5
Figura 6: Metodología DMAIC.....	8
Figura 7: Esquema de una caldera Modificado de [23].	11
Figura 8: Esquema Diagrama de Ishikawa basado en metodología utilizada en empresas AFE [11]	14
Figura 9: Producción OMS. Fuente: elaboración propia con datos de OMS.....	16
Figura 10: Usos del agua dentro de la planta en estudio.	18
Figura 11: Rendimiento para el consumo del agua de lavado.	22
Figura 12: Rendimiento para el uso de vapor de agua.....	23
Figura 13: Rendimiento para la generación de dióxido de carbono.....	24
Figura 14: Rendimiento para el consumo de energía.	25
Figura 15: Gráfica Indicador de Desempeño de agua de lavado de una semana de mayo del 2017.	29
Figura 16: Diagrama de Ishikawa para el consumo de agua de lavado.	29
Figura 17: Diagrama de Ishikawa para el consumo de vapor y emisiones de dióxido de carbono.....	31
Figura 18: Gráfico actual Indicador de Desempeño de Agua Lavado para la tercera semana de diciembre de 2017.	1
Figura 19: Nuevo modelo predictivo y comparación con los datos reales y el actual.	2
Figura 20: Diferencia de metas de consumo de agua de lavado respecto a consumo real.	3
Figura 21: Metodología de construcción de Indicador de Desempeño para el consumo de vapor.....	4
Figura 22: Estrategia de acción para el cumplimiento de metas medioambientales.	8
Figura 23: Producción del período 2013 al 2017.	13
Figura 24: Eficiencia energética de la caldera. Fuente: datos propios empresa.....	26
Figura 25: Gráfico de estimación de consumo de agua de lavado y meta semanal.	40
Figura 26: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 1.	41
Figura 27: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 2.....	42
Figura 28: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 3.....	42
Figura 29: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 4.....	43
Figura 30: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 5.....	43

Índice de Tablas

Tabla 1: Reactores operativos de la planta.	15
Tabla 2: Rendimiento de consumo de agua de lavado y vapor de planta del año 2013 a 2015.....	17
Tabla 3: Metas ambientales para el año 2025.	17
Tabla 4: Rendimiento de agua utilizada para lavado el año 2016.....	21
Tabla 5: Rendimiento de vapor en la planta el año 2016.....	22
Tabla 6: Emisiones de dióxido de carbono de la planta entre el año 2013 y 2017.....	24
Tabla 7: Consumo de energía y rendimiento del año 2013 a 2017.....	25
Tabla 8: avance del mejoramiento del desempeño medioambiental.	26
Tabla 9:Resumen de medidas propuestas.....	1
Tabla 10: Evaluación modelo de consumo de agua de lavado.	3
Tabla 11: Propuesta de calendario de implementación de medidas.....	6
Tabla 12: consumos y rendimientos del agua de lavado y vapor.....	13
Tabla 13: Uso de agua desmineralizada en proceso, año 2016.	16
Tabla 14: Uso de agua desmineralizada en proceso, año 2017.....	16
Tabla 15: Consumo de agua dura utilizada para lavado el año 2016.....	17
Tabla 16: Consumo de agua dura utilizada para lavado el año 2017.....	17
Tabla 17: Consumo total de agua para lavado y rendimientos para el año 2016.....	19
Tabla 18: Consumo total de agua para lavado y rendimientos para el año 2017.....	20
Tabla 19: Mediciones del vapor utilizado en producción OMS, año 2016.....	21
Tabla 20: Mediciones del vapor utilizado en producción OMS, año 2017.	22
Tabla 21: Mediciones vapor utilizado en producción (no corregido).....	23
Tabla 22: Rendimiento de emisiones de dióxido de carbono entre los años 2013 y 2017.	25
Tabla 23: Consumo de gas y vapor producido, año 2017.....	27
Tabla 24: Volumen de metano consumido en la caldera.	27
Tabla 25: Uso anual de vapor en la planta.....	28
Tabla 26: Consumo y rendimiento de energía producto del vapor.	29
Tabla 27: Estado de estandarización de procedimientos de limpieza.....	30
Tabla 28: Estado de estandarización de procedimientos de limpieza (continuación)	31
Tabla 29: Propuesta de documento de registro de lavados.....	32
Tabla 30: Propuesta de documento de auditoría a procedimientos de limpieza.....	33
Tabla 31: Identificación de procesos de limpieza de reactores.	34
Tabla 32: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-500.	35
Tabla 33: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-520.	35
Tabla 34: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor B-524.....	36
Tabla 35: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-600.	36
Tabla 36: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-610.....	37
Tabla 37: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-735.....	37
Tabla 38: Volumen de agua utilizado en los procedimientos de limpieza.	38
Tabla 39: Planificación semanal 18 a 24 de diciembre, 2017 (adaptación).....	39
Tabla 40: Tabla de ingreso de lavados programados para la semana del 18 de diciembre, en base a la programación.	39
Tabla 41: Volumen estimado para cada procedimiento de lavado programado.....	40
Tabla 42: Composición del aire.....	44

1. Introducción

1.1. Antecedentes generales

1.1.1. Contexto global

El cambio climático es un problema que ha comenzado a suscitarse desde mediados del siglo XX [1]. El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ha provocado variaciones de la temperatura de la superficie de la Tierra y del nivel mar, que han expuesto a los seres vivos a riesgos como falta de alimentos, disponibilidad del agua y eventos climáticos extremos, entre otros. Las Figuras 1, 2 y 3 muestran, respectivamente, al aumento de la concentración del principal gas de efecto invernadero, el dióxido de carbono CO_2 , el aumento del promedio anual y decenal de la temperatura de la atmósfera y la variación en el nivel del mar.

Este aumento de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera está en línea con el alza en el nivel del mar y la temperatura promedio del planeta, y supone una correlación entre ellas, ya que las emisiones antropogénicas en el siglo XIX, caracterizado por la industrialización, son las más altas de la historia, teniendo como consecuencia las décadas más cálidas de los últimos 1400 años. [2]

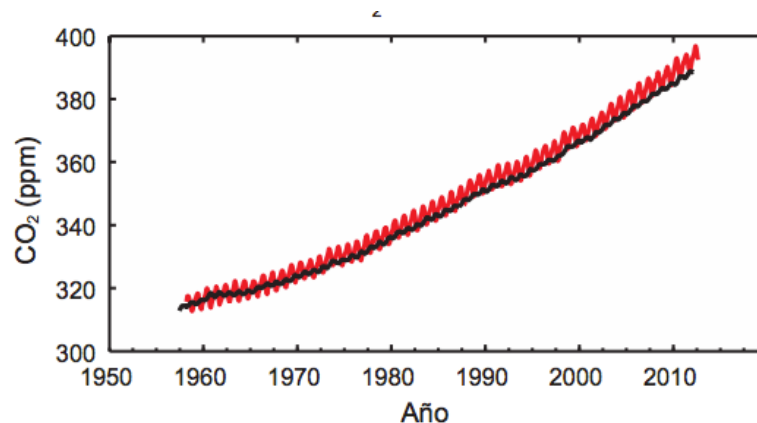


Figura 1: Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. [1]

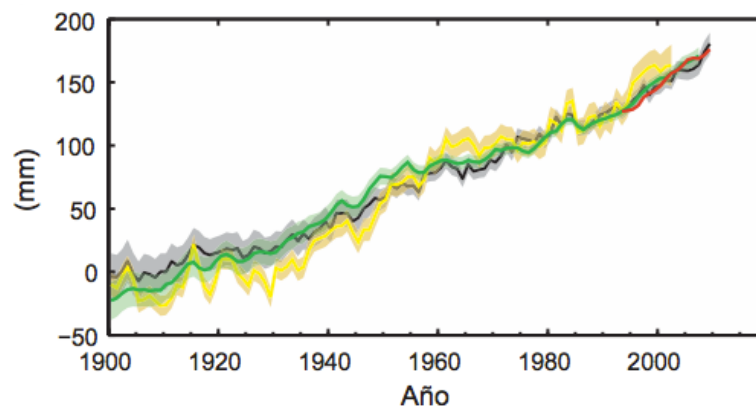


Figura 2: Variación del nivel del mar [1]

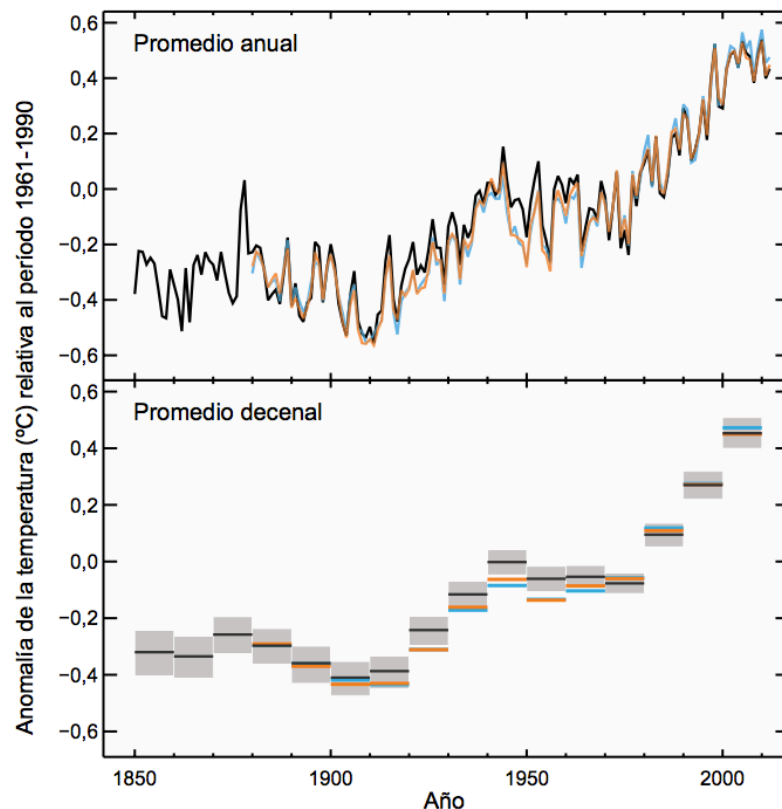


Figura 3: Promedio anual y decenal de la temperatura promedio de la Tierra. [1]

El cambio climático amplifica y crea riesgos para los sistemas naturales y humanos. Estos riesgos están distribuidos por el mundo y, en general, afectan en mayor medida a la población de países de bajos niveles de desarrollo. Estos riesgos globales están relacionados principalmente con la disponibilidad de agua para el consumo humano, flora y fauna, reducción en la calidad y producción de alimentos, propagación de enfermedades y composición de ecosistemas [2].

Las amenazas antes mencionadas han llevado a los gobiernos e industrias de mayor parte del mundo a tomar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, siendo una dimensión del estudio de la sustentabilidad.

La sustentabilidad se basa en el principio de que nuestra supervivencia y bienestar depende de nuestro entorno natural. Es por eso que deben realizarse acciones con el fin de crear y mantener condiciones bajo las cuales, los seres humanos y la naturaleza puedan existir en armonía para apoyar el desarrollo de las actuales y futuras generaciones [3].

Es esta responsabilidad que cabe a la sociedad actual que mandata conocer la situación actual, difundirla y tomar decisiones de diversa índole, tanto en la vida personal, profesional y en el desarrollo de las diversas industrias.

1.1.2. Contexto local

En América Central y del Sur, uno de los principales riesgos producto del cambio climático, será el cambio en la disponibilidad de agua en las regiones semiáridas y dependientes de deshielo, la ocurrencia de eventos extremos como sequías y grandes lluvias, retroceso en glaciares andinos y modificaciones en los caudales de los ríos en la región occidental de Los Andes [4].

Es por esto, que el gobierno de Chile ha tomado acciones concretas como la adhesión al acuerdo de París [5] [6] en el que toma compromisos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y generar resiliencia frente a los impactos que el cambio climático ha provocado.

Adicionalmente, existen otras iniciativas de combate al cambio climático, impulsada por las Naciones Unidas, como los “Objetivos de desarrollo sostenible”. En su punto 12, se pide *Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*, que postula, entre otras medidas, lograr la gestión sostenible y uso eficiente de los recursos naturales. [7]

1.1.3. Clariant®

Clariant es una de las compañías líderes mundiales de químicos especiales, contribuyendo a la creación de valor mediante soluciones innovadoras y sostenibles para clientes de diversas industrias. Posee 7 unidades de negocio: Additives, Catalizadores, Functional Minerals, Industrial & Consumer Specialities (ICS), Masterbatches, Oil & Mining Services (OMS) y Pigmentos. [8]

La unidad de OMS, donde se realizará el estudio, se dedica a la fabricación de productos utilizados en el proceso de flotación de la minería, además de productos intermedios para la industria cosmética.

1.1.4. Sustentabilidad en la empresa

La empresa declara que “consciente de la importancia del equilibrio entre los intereses de la sociedad, la protección del medio ambiente y la eficiencia corporativa, se eligió la sustentabilidad como uno de sus pilares estratégicos”. Para ello, estableció una serie de metas ambientales, basadas, entre otros, en la mejora continua de sus procesos.

Dentro de las metas de reducción al año 2025, se encuentran:

- Disminución del 30% en el consumo de energía.
- Disminución del 30% en las emisiones directas de dióxido de carbono.
- Disminución del 35% en las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero.
- Disminución del 35% en la utilización de agua.
- Disminución del 35% en la descarga de aguas servidas.
- Disminución del 35% en la reducción de residuos.

Estos porcentajes se establecieron en relación con mediciones realizadas el año 2013.

Adicionalmente, existe un sello de excelencia (Figura 4) en sustentabilidad para sus productos, destacando las contribuciones de la compañía para un futuro sustentable.



Figura 4: Sello Ecotain®, compromiso de la empresa con la sustentabilidad. [8]

1.1.5. Agua

El agua es el núcleo del desarrollo sostenible y crítico para el desarrollo social y económico, la conservación de los ecosistemas y la sobrevivencia de los humanos [9]. Es vital para la reducción de las enfermedades y mejoramiento de la salud de las personas, y productividad de la población. Es central para la preservación de muchos de los beneficios y servicios para la humanidad. También es necesaria para la adaptación al cambio climático, sirviendo como un nexo entre los sistemas climáticos, la sociedad y el medio ambiente.

El riesgo de la falta de disponibilidad de agua para el consumo humano y actividades productivas hace necesario impulsar medidas para el uso responsable de este recurso, y la conservación de los cuerpos de agua dulce disponibles en el mundo. Para ello es imprescindible la creación de medias de reducción de consumo y de manejo de residuos que van a napas, ríos, lagos o el océano.

1.1.6. Residuos

Un residuo puede definirse como todo material resultante de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza, cuando su poseedor o productor lo destina al abandono. Dentro de los impactos que puede generar la disposición final de los residuos destacan; alteración de la calidad del agua y del suelo debido a aceites, grasas, metales pesados, ácidos, etc., emisiones atmosféricas como gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) y enfermedades provocadas por vectores sanitarios. [10]

1.1.7. Manejo de residuos

Una correcta gestión de residuos permite reducir los impactos ambientales de éstos. Según la normativa legal vigente (Ley 20.920), existe una jerarquización de etapas que se debe considerar para un correcto manejo de residuos (Figura 5). [11]



Figura 5: Orden jerarquizado de preferencia en el manejo de residuos. [11]

Donde:

- **Prevención:** aplicación de medidas para la reducción de generación de residuos.
- **Reutilización:** uso del residuo en otro o el mismo proceso productivo.
- **Reciclaje:** acción de valorización donde los residuos son transformados en nuevos productos.
- **Valorización energética:** utilización de residuos para la producción de energía, ya sea química o térmica.
- **Deposición final:** eliminación de los residuos en recintos autorizados, como rellenos sanitarios.

Debido al riesgo de escasez de agua en la región, la etapa de manejo de residuos adecuada a utilizar es la prevención de la generación de residuos que puedan contaminar tanto aguas utilizadas en el proceso productivo como los canales, ríos, lagos u océanos en que se vayan a depositar.

1.2. Descripción del proyecto

El trabajo consiste en un estudio del uso de los insumos utilizados en el proceso productivo de la planta de Oil & Mining Services (OMS), que consta fundamentalmente de un reactor que utiliza alcoholes (isobutanol, secbutanol) e hidróxido de sodio, entre otros compuestos, para la producción de insumos de la minería. El estudio propone un diagnóstico del uso de los insumos (agua y vapor) que se utilizan, a partir de los datos disponibles en las recetas y sistemas de control del proceso, y sus flujos mensuales, para definir las prioridades en los planes de reducción.

Luego se definirán planes de acción en el corto y mediano, alineados con las metas que posee la empresa. Finalmente se aplicarán medidas en corto y mediano plazo.

El proyecto que se realizará apuntará en la primera etapa de la jerarquía del manejo de residuos descrito anteriormente, ya que se enfoca en la aplicación de medidas para reducir la generación de residuos a partir del mejoramiento en el uso de los insumos. Además, se pretende avanzar en el cumplimiento de las metas de reducción de la empresa en los insumos que resulten prioritarios.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar técnicamente alternativas de estrategias de reducción de agua de lavado y vapor de agua del proceso productivo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar el proceso productivo a intervenir para generar un caso base mediante análisis de datos de la planta y del sistema de control del proceso.
- Aplicar el método Seis-Sigma para establecer un plan de medidas en el corto y mediano plazo, para la reducción del uso de agua de lavado y vapor.
- Estimar el impacto de las medidas escogidas en término de uso de agua, energía y emisión de gases de efecto invernadero.
- Establecer lineamientos para el control del consumo de agua de lavado y vapor y establecimiento de futuras metas y medidas.

1.4. Alcances

Inicialmente, se estudiará cada actividad en que se utiliza el insumo, verificando procedimientos, funcionamiento de equipos y capacitación de los operarios.

Luego, en conjunto con un equipo formado en la empresa para la implementación del método Seis-Sigma, se evaluarán medidas para la elaboración de un plan de propuesta de medidas para la reducción de agua de lavado y vapor de agua. Este plan contará con intervenciones de corto y mediano plazo. Se espera poder capacitar al personal para mantener tanto las medidas seleccionadas como el método para solucionar otras problemáticas que puedan surgir, abriendo paso a nuevas alternativas de mejora.

El estudio del consumo de vapor de agua contiene mediciones relacionadas con la energía que se consume para la generación del vapor y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la combustión de la caldera.

2. Marco teórico

En esta sección se presentará el método de seis-sigma, metodología que se utilizará para la elaboración de medidas para la reducción en los consumos de vapor y agua de lavado. Además, se presentan las bases teóricas para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la reacción que se ocurre en la caldera de la planta.

2.1. Método Seis-Sigma

El método Seis-Sigma o DMAIC es una metodología utilizada para la disminución de errores en un proceso, a través de la mejora de éste. Esta metodología es utilizada para eliminar los desperdicios del proceso, reducir la variación de un producto, mejorar la productividad y acortar los ciclos de los procesos. [12]

Los desperdicios que trata esta metodología pueden agruparse en 7 categorías [13]:

- Sobreproducción
- Transporte
- Tiempos de espera
- Movimientos
- Sobre proceso
- Inventarios
- Defectos por calidad

La mayoría de los defectos son intangibles, es decir, no se relacionan directamente con la elaboración del producto, sino que por acciones o medidas de gestión que impactan en el desempeño del proceso productivo. La existencia de estos desperdicios puede generar consumos innecesarios, ineficientes y la generación directa e indirecta de residuos.

Esta metodología es utilizada en empresas que poseen un proceso productivo, de diversos mercados, donde se puede encontrar a General Electric, Kodak, Texas Instruments, Motorola [14]; localmente la empresa alimenticia AFE ha aplicado este modelo [11]. Estas empresas utilizan la metodología para reducir las unidades de falla en su producción y, por tanto, reducir los desechos y desperdicio de materia prima e insumos.

La metodología consiste en 5 pasos claves, basados en el esquema DMAIC: *Definir* los problemas o situaciones a mejorar, *Medir* con el fin de obtener los datos necesarios, *Analizar* la información recopilada, *Mejorar* (del inglés Improve) el proceso y *Controlar* los procesos. [15] La Figura 6 muestra gráficamente esta metodología.

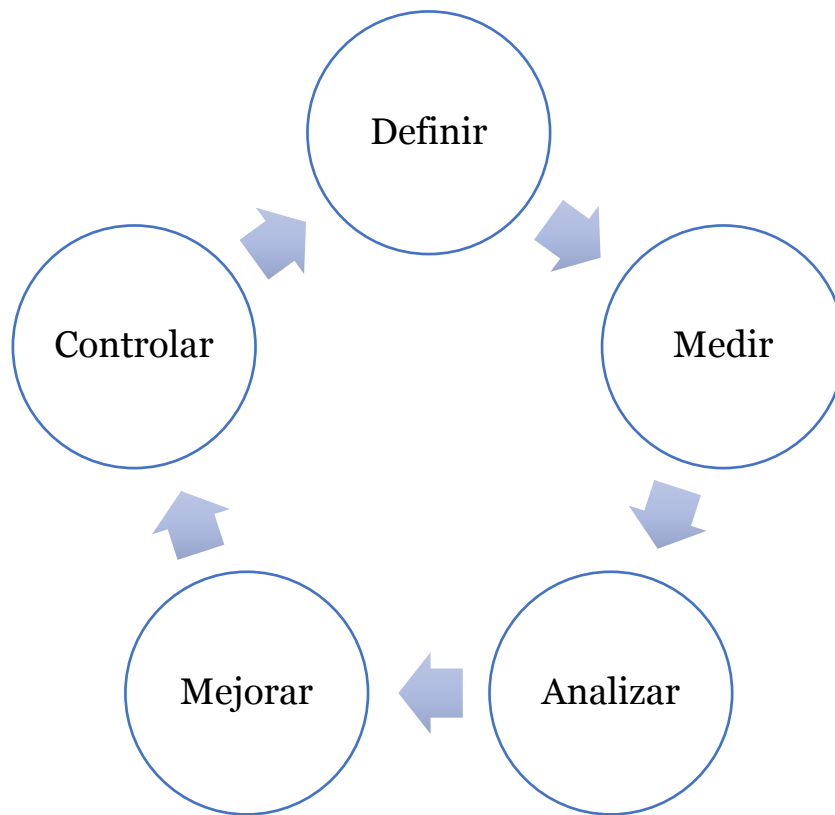


Figura 6: Metodología DMAIC.

Un elemento básico en Seis-Sigma es la formación. Se deben definir roles en que se reconozca a un directivo que defina, apoye y haga seguimiento a los procesos de mejora. También deben conformarse agentes de cambio, quienes estarán a cargo de los distintos equipos de trabajo.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos del método. [16]

2.1.1. Definir

Es la fase inicial de la metodología. Se identifican las posibles oportunidades de mejora, y se entiende el proceso. Se entienden los alcances del proyecto a realizar y el funcionamiento actual del proceso.

2.1.2. Medir

En esta fase, se definen las variables y parámetros que caracterizan el proceso y van a medirse, y de qué forma. Esta fase de recolección de información permite validar o refinar el problema a tratar, para comenzar luego la búsqueda de la causa raíz. Además, si es que existe, se evalúa el sistema de medición actual.

2.1.3. Analizar

Consiste en examinar la información obtenida y se descompone el problema en sus elementos principales, esto es, identificar las posibles causas raíz y evaluar la veracidad de hipótesis para elaborar un plan de posibles medidas de mejora. Para la identificación de causas raíz, se utilizan diversos métodos, como diagrama de causa-efecto, mapeo del problema, causa lógica, de Pareto, diagrama de Ishikawa, entre otros.

2.1.4. Mejorar

Luego de analizar las mediciones realizadas, y se ha determinado las causas de los problemas del proceso, se pretende eliminar los defectos mediante el desarrollo e implementación de medidas preventivas y correctivas.

2.1.5. Controlar

La fase de controlar involucra herramientas que permiten sostener los cambios realizados en el tiempo, además de cerciorarse de que el proceso continúe operando de manera eficiente. Además, deben establecerse los nuevos estándares de ejecución de las actividades.

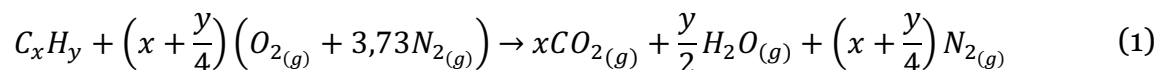
La base teórica de los fenómenos a estudiar se realizará en la medida que se tenga más información respecto del proceso, sus partes y parámetros relevantes.

2.2. Reacciones de combustión

La estimación del consumo de energía a partir del vapor que se consume y las emisiones de gases de efecto invernadero requieren un estudio del equipo que genera el vapor, la caldera y de las reacciones de combustión que en ella ocurren.

La reacción de combustión se basa en la reacción química de una sustancia denominada combustible, con oxígeno. Como consecuencia se obtiene mayoritariamente dióxido de carbono, agua y liberación de energía en forma de luz y calor. También pueden obtenerse compuestos sulfurados o monóxido de carbono. Los combustibles comúnmente utilizados son fósiles, derivados del petróleo, como el Diésel, Kerosene, Gas natural, entre otros. [17]

Si el combustible es un hidrocarburo, usando aire como comburente, la forma general de la reacción de combustión es la siguiente:



Como puede observarse, el nitrógeno es inerte en la reacción. Esto ocurre siempre y cuando la temperatura sea menor a los 600°C; a partir de esta temperatura, se vuelve significativa la formación de óxidos de nitrógeno NO_x. [17]

Para la combustión también pueden utilizarse mezclas que contienen oxígeno, siendo la más común el aire. El aire está compuesto fundamentalmente, en volumen, por un 78,08% de N₂ y por un 20,95% de O₂. El porcentaje restante está formado gases nobles, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno y ozono, entre otras trazas. [18]

Los procesos de combustión pueden clasificarse en:

- Combustión completa.: el combustible reacciona hasta el máximo grado posible de oxidación, por lo que no habrá sustancias combustibles gases del producto.
- Combustión incompleta: el combustible no se oxida completamente, generándose sustancias como CO, H₂, H₂S y C.
- Combustión teórica o estequiométrica: se realiza con la proporción teórica de oxígeno necesaria para la oxidación completa de combustible, sin que se produzcan sustancias de una combustión incompleta.
- Combustión con exceso de aire: la dosificación de aire es superior a la estequiométrica. A pesar de que no se producen compuestos de combustión incompleta, la presencia de oxígeno en los productos genera una pérdida de calor.
- Combustión con escasez de aire: genera combustión incompleta por una presencia de oxígeno menor a la estequiométrica.

2.3. Caldera

Una caldera es un equipo que está destinado a transferir a un fluido, generalmente agua, el calor liberado por una combustión. Las calderas pueden utilizarse para la producción de vapor o agua caliente, cuyos usos pueden ser la generación eléctrica, sistemas de calefacción o suministro de agua caliente [19]. El cambio de fase del agua dentro de la caldera se representa en la siguiente ecuación química, en conjunto con su calor latente [20]. También debe considerarse el calor específico del agua para llevarla a su punto de ebullición, cuyo valor promedio en el rango de temperaturas de 27 a 97 [°C] es $71,4 \left[\frac{kJ}{mol \cdot K} \right]$ [21]



La Figura 7 muestra un esquema del equipo [22], con su funcionamiento básico. Se posee una fuente de calor proveniente de la combustión del gas, que es la que calienta y evapora el agua y forma el vapor. La reacción de combustión produce gases (*Gases combustión* en la figura) que son emitidos a la atmósfera y ayudan a calentar el agua que entra al equipo.

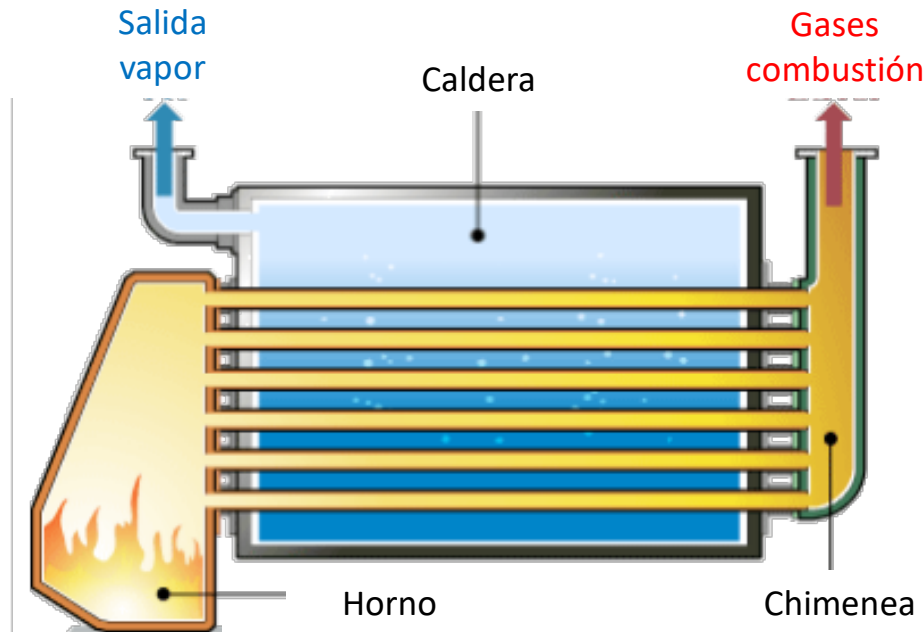


Figura 7: Esquema de una caldera Modificado de [23].

2.3.1. Eficiencia de caldera

Se define la eficiencia de la caldera como la razón entre el calor absorbido por el fluido para calentarse y cambiar de fase, y el vapor generado producto de la combustión del combustible: [24]

$$\eta_c = \frac{H_{abs}}{H_{com}} \quad (3)$$

Con:

H_{abs} : calor absorbido por el fluido [kJ]

H_{com} : calor generado por la combustión [kJ]

3. Metodología

Para realizar un estudio del proceso y de los diferentes problemas que existen en relación con el uso del agua de lavado y vapor de agua, se utilizará el método Seis-Sigma. Adicionalmente, mediante el estudio de la caldera y las reacciones que ocurren en ella se podrá estimar la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo de energía asociado al vapor. Finalmente, mediante las metodologías que a continuación se presentan se establecerán lineamientos para el control y establecimiento de futuras medidas.

3.1. Aplicación método Seis-Sigma

A continuación, se presenta la forma de abordar cada una de las 5 etapas del método: definir, medir, analizar, implementar y controlar. Cabe destacar que las diversas etapas deben realizarse en equipo con los operadores, jefaturas y encargados del control del proceso, para obtener un análisis nutrido y elaboración consensuada de las medidas.

3.1.1. Definir

En esta etapa se realizará un estudio acabado del proceso productivo, identificando corrientes de entrada, salida, insumos, servicios de cada etapa, mediante visitas a la planta. También se priorizarán los insumos en estudio según las necesidades de la empresa y se definirá cuales serán los insumos más relevantes para tratar.

3.1.2. Medir

Luego de estudiar el proceso productivo, se consultará por los métodos de medición de uso del insumo a reducir, y se adquirirá la información disponible. Además, se recolectará información respecto de las metas de la empresa y se definirán los alcances de las medidas.

3.1.3. Analizar

Mediante la elección de un método de análisis de causas raíz, se determinarán los motivos por lo que el uso del insumo no es óptimo. Con esto se tendrá una línea base para la elaboración de medidas de corto y mediano plazo.

3.1.4. Mejorar

En esta fase, y luego de analizar en conjunto con todos los actores relevantes, se elaborará un plan de medidas para la reducción del insumo seleccionado. Constará de medidas de corto y mediano plazo. Las medidas de corto plazo, en la medida que el tiempo sea suficiente, se implementarán durante el período de elaboración de la memoria, capacitando a todo el personal involucrado. Esta es una parte fundamental del trabajo, ya que permitirá medir alguno de los impactos de la utilización del método, principalmente mediante un análisis técnico. Las medidas de mediano plazo quedarán documentadas para ser implementadas en el tiempo, o modificadas según la empresa lo requiera. Por tal razón, estas últimas medidas no tendrán medición de impacto. Otra forma de medición de resultados se relacionará con la respuesta de los trabajadores a las medidas implementadas y a la capacitación para una buena implementación del método, en donde se hayan definido y cumplido los roles de cada persona. Este último análisis entregará una dimensión de clima laboral, clave en el desarrollo sostenible. [25]

3.1.5. Controlar

Se estandarizarán procedimientos en el plan de mejora, con lo que se asegure que las medidas se mantengan en el tiempo.

3.2. Método de análisis de causa raíz

Para analizar las causas de los problemas, en este caso, de los consumos de insumos al interior de la planta, es necesario realizar un análisis de causa raíz. A través de una metodología se identifican los problemas y se comprueban y analizan sus causas. Estos métodos son parte de la mejora continua de los procesos.

3.2.1. Diagrama de Ishikawa [26]

El Diagrama de Ishikawa o “Espina de pescado” es un ejercicio de representación gráfica sobre un fenómeno, problema o hecho y su potencial relación con los factores que estarían involucrados en su ocurrencia. De esta manera, a través del diagrama se intenta evidenciar de manera clara y directa la relación de un efecto con sus posibles causas, distinguiendo además entre aquellas más significativas (primarias) y aquellas cualitativa y cuantitativamente menos preponderantes (secundarias) en la realización del efecto.

3.2.1.1. Construcción del diagrama

Tal como su nombre lo indica, el primer paso para la construcción de la gráfica consta de flecha central, correspondiente a una columna vertebral que apunta en la dirección del efecto o problema.

El segundo paso es realizar una lista de las posibles causas que generan el problema. Una vez realizado el catastro, las causas deben jerarquizarse entre aquellas directamente relacionadas con la problemática y otra que no están tan vinculadas; estas serán causas principales y secundarias, respectivamente. Las causas principales estarán vinculadas a la columna vertebral a través de “espinas”, y las causas secundarias se adosan a las espinas principales si estuvieran relacionadas.

La Figura 8 muestra el esquema de construcción del diagrama de Ishikawa.

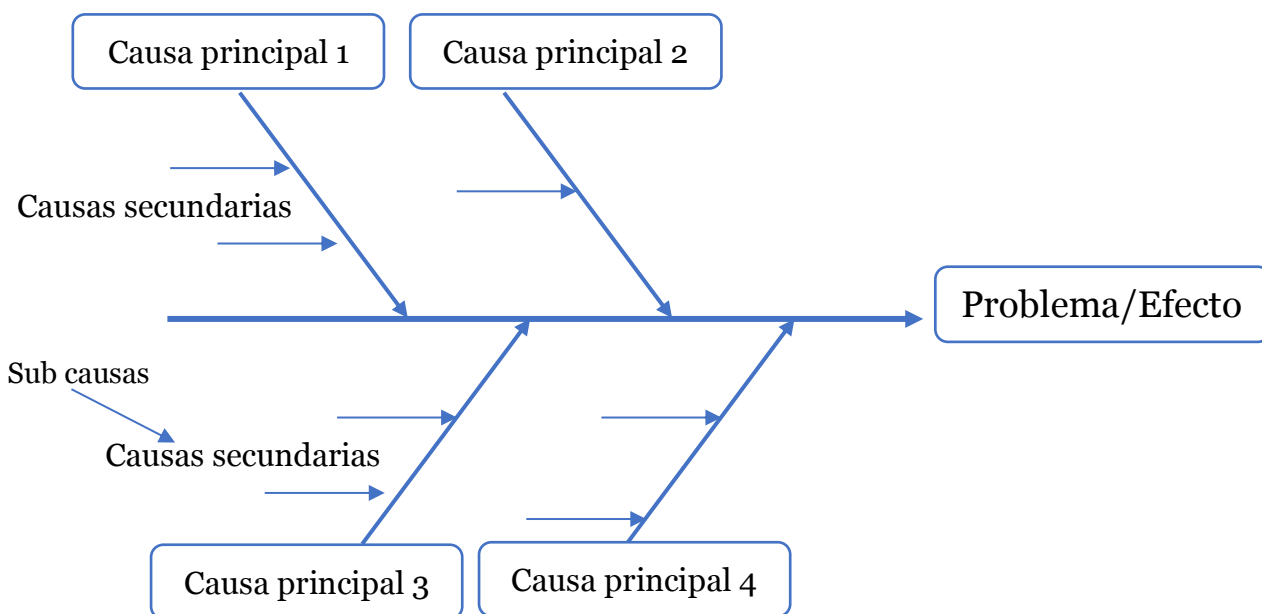
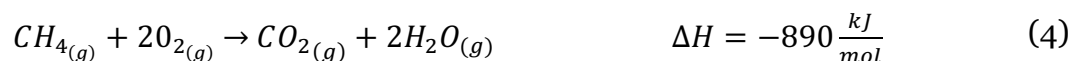


Figura 8: Esquema Diagrama de Ishikawa basado en metodología utilizada en empresas AFE [11]

3.3. Cálculo de emisiones de dióxido de carbono

Para el cálculo de emisiones de CO₂, producto de la combustión de metano en la caldera, se debe considerar la reacción principal que ocurre dentro de la caldera: [27]



A través de registros de la empresa se puede obtener el metano que ingresó a la caldera para este proceso. Para las estimaciones de reducción de posibles medidas, debe considerarse además la eficiencia de la caldera [28].

4. Resultados: Aplicación del método Seis-Sigma

A continuación, se presenta el desarrollo de la aplicación de la metodología Seis-Sigma para el consumo de agua de lavado, vapor de agua, energía asociada al vapor de agua y emisiones de dióxido de carbono de la combustión de la caldera.

4.1. Definir

4.1.1. Proceso productivo

El proceso productivo tiene fundamentalmente un equipo, el reactor. En este equipo se realiza un proceso batch, en que se fabrican diversos productos, dependiendo de las condiciones de operación, la naturaleza del producto, el mecanismo de reacción y el material del reactor que se está utilizando. Si la materia prima es sólida, ésta se carga de forma manual por un operador. Las materias líquidas y gaseosas ingresan a través de cañerías al tanque. Debido a la simplicidad del proceso, en términos de operaciones unitarias, no se adjunta diagrama de flujos.

La planta fabrica 58 productos, entre los que se encuentran químicos para la flotación en minería, insumos para la industria cosmética y emulsiones para la fabricación de adhesivos.

La planta en estudio posee 6 reactores operativos, de los cuales uno es de fibra de vidrio, que se utiliza para la fabricación de productos alcalinos, ya que tiene recubrimiento para aquello. Dos reactores son vitrificados, para la fabricación de productos ácidos, y tres de acero inoxidable para reacciones altamente exotérmicas. La Tabla 1 muestra cada uno de los reactores operativos, su tipo y capacidad másica y volumétrica.

Tabla 1: Reactores operativos de la planta.

Nombre Reactor	Tipo	Capacidad [t]	Capacidad [m^3]
R-500	Acero inoxidable	5	5
R-520	Acero inoxidable	9	8
B-524	Fibra de vidrio	10	10
R-600	Vitrificado	7	6
R-610	Acero inoxidable	10	8
R-735	Vitrificado	17	16

4.1.2. Elección de los insumos a estudiar y metas

La elección como insumos a reducir del agua de lavado y el vapor de agua se enmarca en el plan de la empresa de mejorar los indicadores ambientales mencionados en las metas al año 2025. Además, como el uso de ambos insumos es parte del proceso productivo, el plan de medidas supone el establecimiento de líneas base para una mejora continua del proceso en esta materia.

Se escoge sólo agua de lavado, y no todos los tipos de agua, ya que es el único capaz de reducirse mediante acciones; el agua potable y desmineralizada son parte del producto final y dependen de la receta que la compañía posee para la elaboración y de la productividad. Sin embargo, el uso de agua dura y desmineralizada utilizadas para lavar sí son posibles de disminuir aplicando el método Seis-Sigma.

Adicionalmente, a raíz del estudio del vapor, es posible realizar una estimación de la energía asociada a la generación de éste en la caldera y de los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono principalmente) que se emiten a la atmósfera producto de la reacción de combustión.

Dado que la producción es variable a través de los años, se mostrarán tablas con los resultados nominales, y reales normalizados por la producción. Así, se puede inferir cuáles son los meses de mayor y menor consumo, en términos relativos. Se ha verificado que del 2016 al 2017 hubo un aumento significativo en la producción de un 42,1%, siendo esta constante en los años anteriores. La Figura 9 muestra la productividad mensual y el promedio anual del 2016 y 2017.

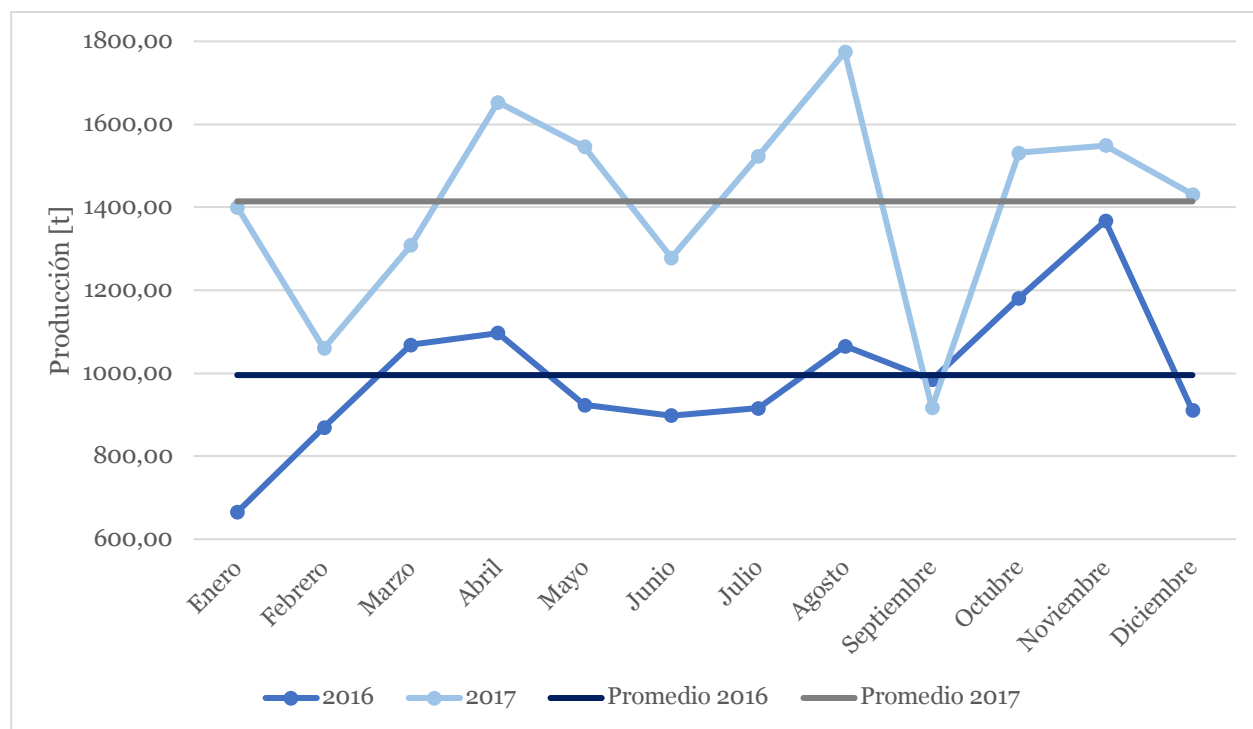


Figura 9: Producción OMS. Fuente: elaboración propia con datos de OMS.

Para el establecimiento de las metas de reducción, se realizaron mediciones el 2013, las que se encuentran en la Tabla 2. Se acompañan además los datos de los años 2014 y 2015, con el propósito de realizar un seguimiento de los rendimientos el período comprendido entre el establecimiento de las metas y la actualidad. [29] Detalles de los cálculos se encuentran en el Anexo A.

Tabla 2: Rendimiento de consumo de agua de lavado y vapor de planta del año 2013 a 2015[29].

Año	R_a $\left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right]$	R_v $\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$
2013	220,14	87,09
2014	202,97	61,97
2015	203,30	86,56

Las metas de reducción al año 2025 relacionadas con el estudio de los insumos escogidos son las siguientes:

- Disminución del 30% en el consumo de energía.
- Disminución del 30% en las emisiones directas de dióxido de carbono.
- Disminución del 35% en la utilización de agua.

Por lo tanto, considerando los rendimientos del año 2013 y las metas de reducción, los objetivos para el año 2025 son los que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Metas ambientales para el año 2025.

Aspecto ambiental	Meta al año 2025	Unidad
Vapor	60,96	$\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$
Agua de lavado	143,09	$\left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right]$
Energía (vapor)	196,91	$\left[\frac{MJ}{t \text{ producto}} \right]$
Emisiones CO ₂	35,03	$\left[\frac{kg \text{ CO}_2}{t \text{ producto}} \right]$

Respecto a las mediciones que se realizarán, se obtendrá un rendimiento anual normalizado por la producción, comparable con las metas enunciadas para tomar decisiones operativas, y se calculará una media móvil de 3 años, con el fin de mostrar tendencias y utilizarlas en medidas de mediano plazo de tipo estratégicas.

4.1.3. Uso de agua en la planta

En la planta se distinguen 3 tipos de agua: potable, dura y desmineralizada.

El agua potable es aquella obtenida desde la compañía distribuidora de la zona, el Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado, SMAPA. Se utiliza exclusivamente para elaboración de producto.

El agua dura es obtenida de un pozo que se encuentra en el terreno donde se ubica la planta. Su uso es para el enfriamiento de los equipos (agua de enfriamiento) y para el lavado de los estanques, mangueras y superficies en general (agua de lavado).

El agua desmineralizada, llamada agua de osmosis en la planta, se produce en una planta ubicada dentro de la empresa. Una fracción se utiliza para la elaboración de productos y otra para la limpieza de equipos con cañerías de bajo diámetro, con el fin de evitar la formación de precipitados en ellas. También se utiliza para la formación de vapor en las calderas.

La Figura 10 muestra los distintos tipos de agua dentro de la planta y sus usos.

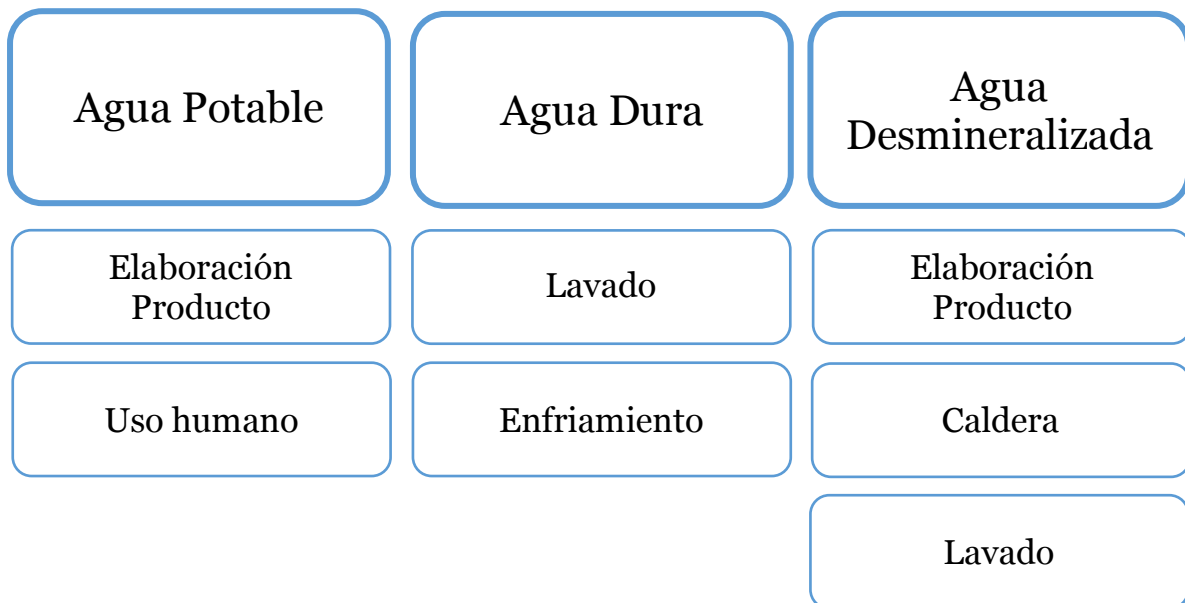


Figura 10: Usos del agua dentro de la planta en estudio.

4.1.4. Procesos de lavado

Existen seis diferentes tipos de lavado, que se realizan dependiendo de los productos que se fabrican y del uso posterior del respectivo reactor luego de una fabricación:

- **Urraqueado:** uso de hidrolavadora para la limpieza de paredes. Es utilizado principalmente en los reactores de vidrio, ya que no pueden lavarse con agua caliente. También se utiliza como complemento a los otros tipos de lavados para retirar manchas o restos que puedan quedar luego del proceso de lavado.
- **Enjuagado con agua fría:** uso de manguera para limpiar paredes del reactor y bomba. Se utiliza cuando el producto que va a fabricarse posteriormente es de la misma naturaleza química, pero no iguales. Por ejemplo, cuando se fabrican dos productos ácidos acompañados de alcoholes diferentes.
- **Enjuagado con agua caliente:** igual procedimiento de enjuagado con agua fría. Se utiliza cuando el producto a fabricar es de la misma naturaleza química, pero que es su proceso productivo deja restos como geles o manchas en las paredes del reactor.
- **Vaporizado:** ingreso de vapor al interior del estanque para la limpieza de las paredes. Es un proceso de limpieza más profundo que el enjuagado y se utiliza cuando los productos fabricados y por fabricar son de naturalezas químicas e industrias diferentes. El caso más recurrente es cuando se pasa de un producto de la industria minera a otro de la cosmética.
- **Lavado con agua caliente:** llenado completo del reactor con agua caliente y detergente. Es el proceso de limpieza más complejo e intensivo en agua. Se utiliza cuando los productos terminados y por fabricar son incompatibles, ya que un posible contacto puede producir reacciones indeseadas o contaminación del producto final. Dentro de los lavados, deben realizarse lavados especiales para ciertos productos, utilizando detergentes y químicos diferentes a un lavado común.
- **Lavado especial:** llenado completo del reactor y uso de compuestos, como soda cáustica e hipoclorito de sodio.

El proceso de lavado que se utiliza está estipulado en documentos denominados *Work Instruction* (WI). Estos protocolos indican la frecuencia de los lavados, las instrucciones del proceso de limpieza, como concentraciones flujos y equipos auxiliares.

4.1.5. Uso de vapor en la planta

El vapor de agua utilizado en la planta se produce en una caldera, que utiliza como combustible gas natural, cuya composición posee un 97% de metano CH_4 [30]. El agua proporcionada a la caldera proviene de la planta de osmosis inversa, es decir, utiliza agua desmineralizada para el proceso.

El vapor producido en la caldera se utiliza en tres procesos: el vaporizado de camiones y reactores, calentar agua utilizada en lavado y para calentar mezclas en la fabricación de productos.

4.2. Medir

4.2.1. Consumo actual de agua de lavado

La Tabla 4 muestra el rendimiento de agua de lavado en los últimos dos años. El rendimiento normaliza el agua utilizada en lavado por la producción mensual. El agua de lavado se compone de agua dura y desmineralizada. La Figura 15 muestra el resumen de estos datos entre el año 2013 y 2017, en conjunto con la meta de reducción. Los datos de cada tipo de agua y el detalle de los cálculos se encuentran en el Anexo B.

Tabla 4: Rendimiento de agua utilizada para lavado el año 2016.

Mes	$R_{a,2016}$ $\left[\frac{l\ agua}{t\ producto} \right]$	$R_{a,2017}$ $\left[\frac{l\ agua}{t\ producto} \right]$
Enero	196,93	151,63
Febrero	114,09	141,82
Marzo	165,55	179,30
Abril	173,55	140,24
Mayo	256,31	211,32
Junio	139,00	192,54
Julio	251,94	94,13
Agosto	249,02	200,62
Septiembre	293,94	186,52
Octubre	283,25	192,75
Noviembre	328,15	214,64
Diciembre	235,73	174,84
Total anual	229,55	173,82

La Figura 11 contiene los datos de rendimiento entre el año 2013 y 2017, junto con la meta al año 2025 y el promedio móvil de 3 años. El rendimiento anual será de utilidad para el establecimiento de medidas del corto plazo, mientras que la media móvil presenta una tendencia que permite tomar decisiones estratégicas de mediano plazo. En ambas curvas se observa una tendencia mixta, con períodos de crecimiento y decrecimiento del rendimiento del agua de lavado.

El uso de la media móvil se justifica en que captura la tendencia del período considerado (3 años), y que la medición no crece ni baja con rapidez, por lo que representa una medida confiable para establecer el cumplimiento de la meta.

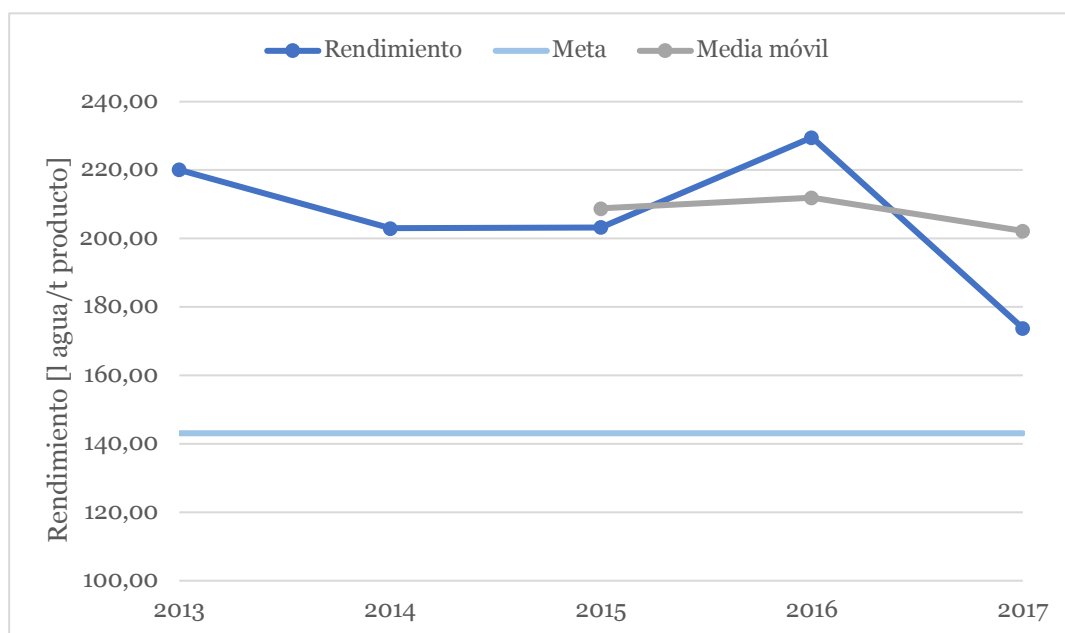


Figura 11: Rendimiento para el consumo del agua de lavado.

4.2.2. Consumo actual de vapor de agua

La Tabla 5 muestra la masa de vapor utilizado y rendimiento anual del vapor de la planta para el 2016 y 2017. Este último se obtuvo mediante la lectura de un medidor ubicado en la sala de las calderas, normalizando por la productividad de ese período. Las mediciones y cálculos se encuentran en el Anexo C.

Tabla 5: Rendimiento de vapor en la planta el año 2016.

Mes	$R_{v,2016}$ [$\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}}$]	$R_{v,2017}$ [$\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}}$]
Enero	48,7	36,9
Febrero	103,0	57,2
Marzo	64,3	53,6
Abril	68,6	24,9
Mayo	122,8	54,6
Junio	87,6	59,9
Julio	67,9	44,3
Agosto	79,3	30,7
Septiembre	61,6	110,0
Octubre	83,0	81,3
Noviembre	79,2	71,5
Diciembre	72,7	57,3
Total anual	78,52	54,50

*No se poseían mediciones de estos meses, por lo que fueron estimadas en base a los datos intermedios. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo D.

La Figura 12 muestra un resumen de los rendimientos medidos desde el año 2013 a la fecha, la meta de reducción al 2025, y la media móvil de 3 años para el rendimiento del vapor de agua. Debido a la variabilidad de los datos, se considerará la media móvil al momento de comparar el avance en los objetivos de reducción de los insumos, para así capturar la tendencia de los datos y tomar decisiones estratégicas. Los datos anuales se utilizarán para las decisiones operativas que se tomarán.

En la figura se observa que la media móvil correspondiente al 2017 es de $73,19 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$, lo que corresponde a una reducción del 15,96% respecto de las mediciones del 2013 (la meta es del 30%).

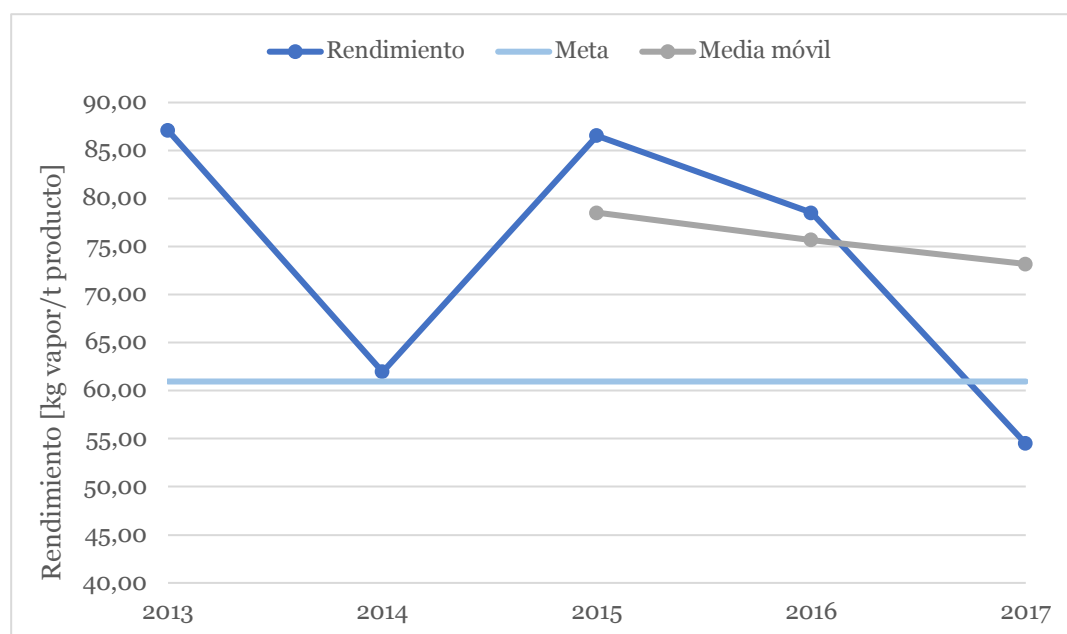


Figura 12: Rendimiento para el uso de vapor de agua.

4.2.3. Emisiones de CO₂

Considerando el consumo de gas natural y la Ecuación (4), la Tabla 6 muestra la masa de dióxido de carbono estimado a partir del flujo de gas natural alimentado a la combustión, por tonelada de producto elaborado y el total de emisiones estimado por concepto de uso de la caldera desde el año 2013 a 2017. El Anexo E muestra los cálculos de la generación de CO₂.

Tabla 6: Emisiones de dióxido de carbono de la planta entre el año 2013 y 2017.

Año	Metano consumido [m³]	CO₂ generado [t]	Producción [t]	R_g [$\frac{kg CO_2}{t \text{ producto}}$]
2013	311.067	570,57	11.402	50,04
2014	338.991	621,79	12.268	50,68
2015	324.141	594,56	11.953	49,74
2016	359.542	659,49	11.945	55,21
2017	327.015	599,83	16.971	35,34

La Figura 13 muestra los datos de dióxido de carbono estimado en el período 2013 a 2017, la meta y la media móvil de 3 años.

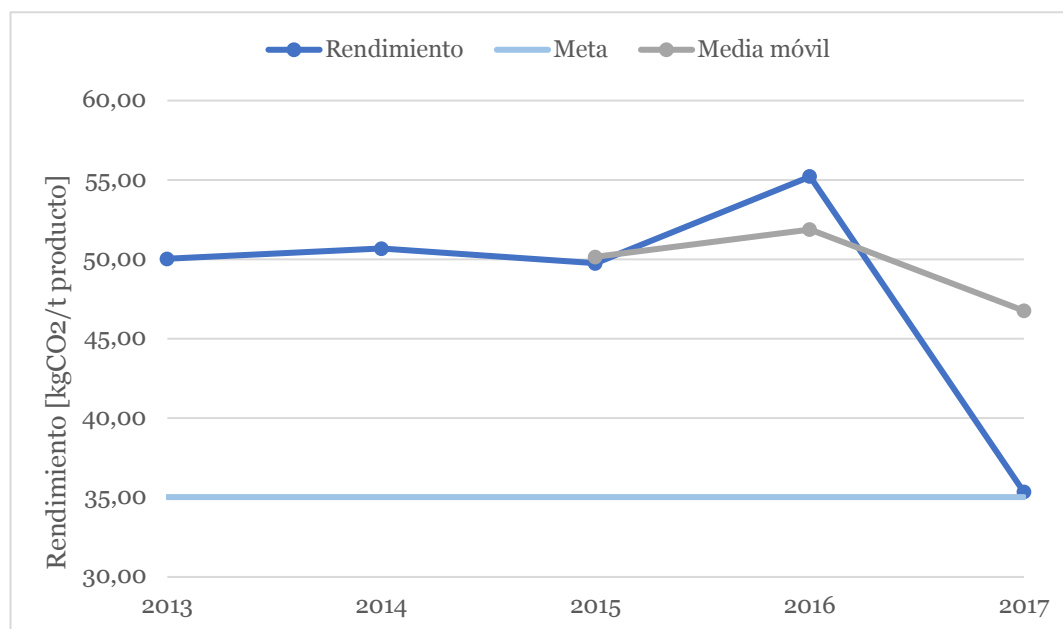


Figura 13: Rendimiento para la generación de dióxido de carbono.

El promedio móvil de las emisiones de dióxido de carbono presenta comportamiento mixto, por lo que no se puede asegurar que siga descendiendo en el tiempo.

4.2.4. Energía

A partir del vapor generado y la eficiencia actual de la caldera (70%), es posible estimar la energía que se consume en el proceso de evaporación de la caldera. La Tabla 7 muestra los resultados desde el año 2013 al 2017. Además, se incluye un rendimiento por tonelada de producción. En tanto, la Figura 14 muestra estas mediciones, la meta al 2025 y la media móvil de 3 años del período. Información detallada de la eficiencia de la caldera se muestra en el Anexo F. Los cálculos pueden encontrarse en el Anexo G.

Tabla 7: Consumo de energía y rendimiento del año 2013 a 2017.

Año	Energía [GJ]	Producción [t]	R_e $\left[\frac{MJ}{t \text{ producto}} \right]$
2013	3.207,39	11.402	281,30
2014	2.455,45	12.268	200,15
2015	3.342,08	11.953	279,60
2016	3.029,48	11.945	253,62
2017	2.987,23	16.971	176,02

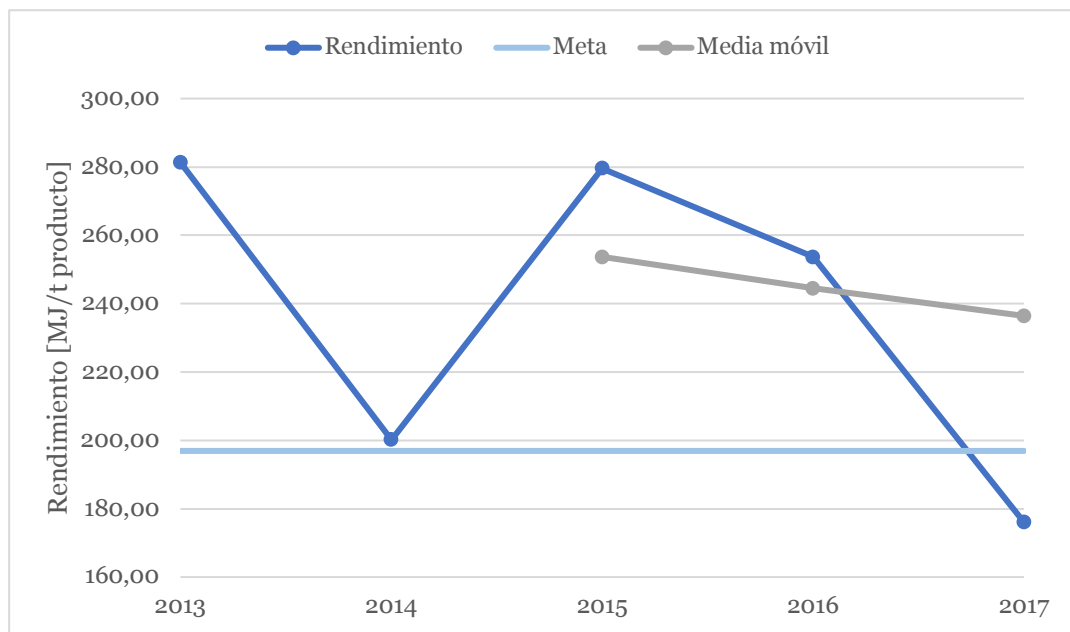


Figura 14: Rendimiento para el consumo de energía.

A pesar de que el año 2017 se obtuvo un rendimiento inferior al de la meta al año 2025, la variabilidad de los datos no asegura que este valor se mantenga o siga descendiendo en el tiempo. Por esta razón se considerará la media móvil para evaluar el grado de cumplimiento de las metas.

4.2.5. Avance actual del mejoramiento del desempeño medioambiental

Considerando los datos de rendimiento para cada insumo del año 2013, y utilizando las medias móviles del año 2017, se puede calcular el estado actual de cumplimiento de las metas al año 2025. La Tabla 8 muestra el avance actual del desempeño medioambiental y los cumplimientos de las metas. El avance actual se calcula comparando la meta al 2025 con la media móvil actual, mientras que el cumplimiento de la meta muestra el porcentaje de la meta que se ha cumplido. Por ejemplo, para el vapor, la meta de reducción es del 30% y actualmente la reducción ha sido del 16%, por lo que se tiene un 53% de cumplimiento de la meta.

El mejor desempeño se observa en el consumo del vapor y energía, con un 53%, mientras que la menor reducción se observa en el agua de lavado y las reducciones de dióxido de carbono, con un 23% de cumplimiento cada uno.

Tabla 8: avance del mejoramiento del desempeño medioambiental.

Aspecto ambiental	Meta reducción	Meta al 2025	Media móvil actual	Reducción actual	Cumplimiento meta (desempeño)
Vapor	-30%	60,96 $\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$	73,19 $\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$	-16%	53%
Agua de lavado	-35%	143,09 $\left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right]$	202,22 $\left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right]$	-8%	23%
Energía (Vapor)	-30%	196,91 $\left[\frac{MJ}{t \text{ producto}} \right]$	236,41 $\left[\frac{MJ}{t \text{ producto}} \right]$	-16%	53%
Emisiones de CO ₂	-30%	35,03 $\left[\frac{kg \text{ CO}_2}{t \text{ producto}} \right]$	46,77 $\left[\frac{kg \text{ CO}_2}{t \text{ producto}} \right]$	-7%	23%

4.3. Analizar

4.3.1. Agua de lavado

A partir de los datos obtenidos y de la observación de los procedimientos de la empresa, se consideraron 4 como las principales causas que contribuyen al alto consumo de agua de lavado:

- Mediciones.
- Estandarización de procesos de lavado.
- Metas de consumo.
- Uso de la hidrolavadora.

4.3.1.1. Mediciones

Un aspecto importante que debe existir para el establecimiento de medidas de reducción y control del uso de agua de lavado es la medición del consumo. En los datos levantados el año 2013, no se consideraba el agua de lavado proveniente de la planta de osmosis inversa. Es por esto que algunos consumos presentan un nivel menor del real. El KPI de agua de lavado de la planta tampoco considera el agua desmineralizada, solo el agua dura para los procesos de limpieza.

Adicionalmente, se detectó que la medición no siempre se realiza como está establecida (al final de cada turno), por lo que no se tiene una información completa del consumo por cada turno de trabajo.

La existencia de mediciones certeras y periódicas significan una base para el establecimiento de metas y modificaciones tanto a procedimientos de lavado como de la producción misma, por lo que se convierte en una obligación tenerlas. Sin ellas los operadores y jefes de turno no tienen una referencia de consumo y por tanto no se puede manejar el uso.

4.3.1.2. Estandarización de los procesos de lavado

Ajustar los consumos de agua de lavado requiere necesariamente un punto inicial de comparación y medición de avance, que viene dado por una Instrucción de Trabajo (denominado en la empresa como *Work Intruction*) de cada proceso de lavado para cada reactor, equipo auxiliar o manguera, donde se indica la forma de lavar y los tiempos y flujos que deben utilizarse. Actualmente no existe tal estandarización, por lo que deben realizarse estimaciones a partir de observación y experiencia de los operadores para obtener un volumen de agua utilizado, sin tener una medida de comparación de que aquel es el óptimo.

Para reducir el uso del agua de lavado debe instaurarse formalmente una estandarización de cada proceso, y auditorías periódicas para ajustar estas recetas y realizar un mejoramiento continuo.

4.3.1.3. Metas de consumo

Actualmente, existe un Indicador de Desempeño (KPI) que mide agua de lavado, donde en cada turno se reporta el consumo de agua acumulado durante la semana, mediante la observación de un medidor ubicado dentro de la planta. Este consumo acumulado se registra desde el lunes al sábado. El consumo acumulado que se registra en cada turno (barras de la Figura 9) y se compara con una estimación de uso de agua, de crecimiento lineal y que considera un máximo de 20[m³] de consumo para la semana. No se encontró evidencia para explicar este volumen máximo de consumo, sin embargo, se manifestó que anteriormente este máximo se estimaba en base a la producción semanal programada.

Al no existir una meta real de consumo, no se produce una responsabilidad con el uso del recurso, ya que de antemano se sabe que, de existir un lavado completo de equipo, la meta no se cumplirá. La Figura 15 muestra las mediciones de una semana del 2017 en que se superó ampliamente la meta de consumo a partir del turno B del viernes, en que se realizó el lavado del reactor R-735. De este punto en adelante, se pierde la perspectiva del uso del agua, y podría tenderse a gastar de más.

Otro factor que afecta el establecimiento de una meta de consumo es el constante cambio en la programación semanal de producción dado la alta cantidad de pedidos no programados que se realizan. Además, el notable aumento en la producción acerca a la planta a su máxima capacidad, por lo que el personal de trabajo no posee el tiempo suficiente para modificar o mejorar la estimación.

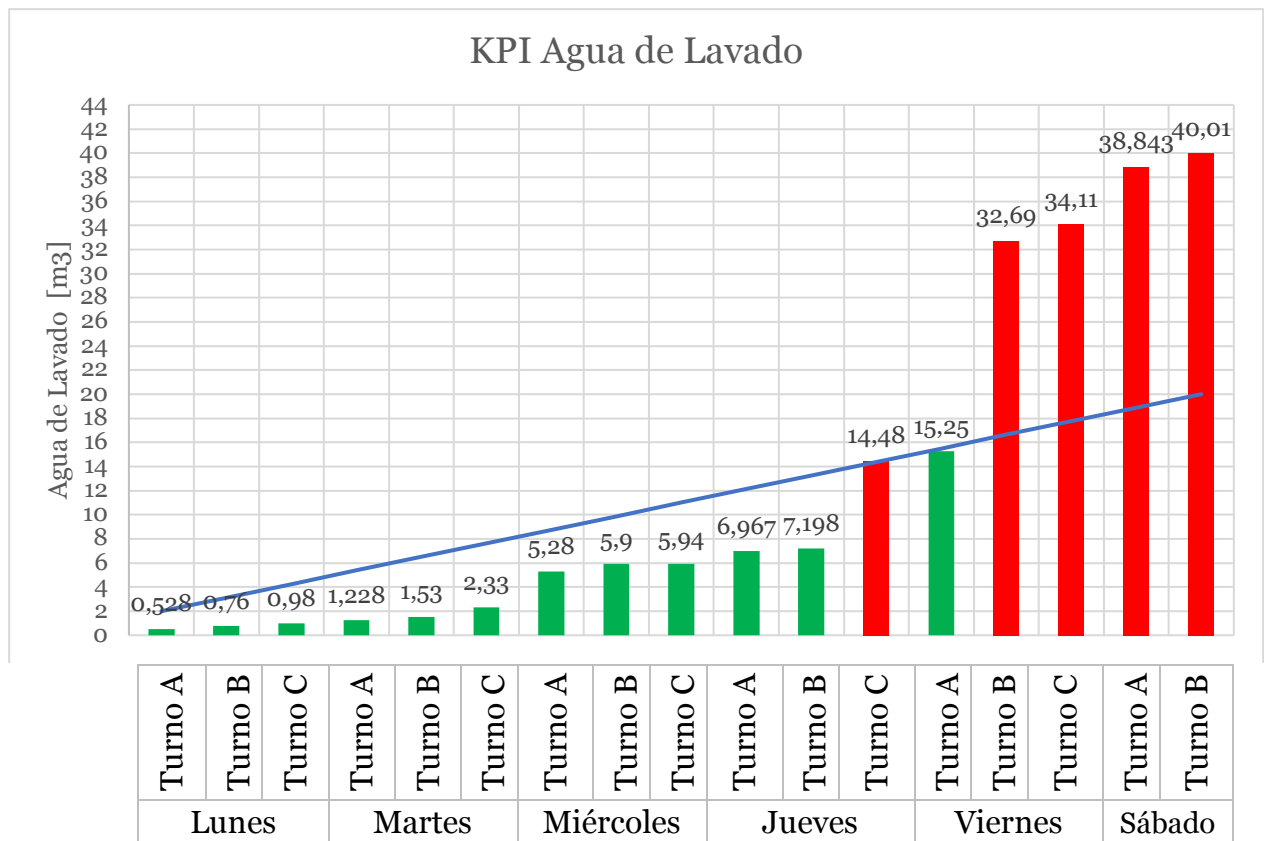


Figura 15: Gráfica Indicador de Desempeño de agua de lavado de una semana de mayo del 2017.

4.3.1.4. Uso de la hidrolavadora

La planta posee una hidrolavadora para realizar el proceso de limpieza denominado *Urraqueado*. Tener solo una hidrolavadora podría provocar que, de presentar una falla en su funcionamiento, deban utilizarse otros procedimientos de lavado, tales como el enjuague con agua fría o caliente, o vaporización, lo que implica un gasto adicional de agua de lavado, vapor y energía.

Adicionalmente, se detectó que el acceso de todos los reactores al equipo es complejo, debido a la disponibilidad de mangueras de la suficiente longitud y pistolas de aplicación, por lo que debe moverse el equipo, complejizando su uso. Este problema podría extenderse en corto plazo debido al aumento de la producción y una posible expansión de la planta en el caso de que se instalaran nuevos reactores.

4.3.1.5. Diagrama de Ishikawa para el agua de lavado

La Figura 16 muestra el diagrama de Ishikawa del consumo del agua de lavado. En él se presenta una síntesis de las causas del alto de consumo de lavado separado en problemas de menor envergadura, y las causas de ellos. Esta metodología da una perspectiva más detallada del y permite solucionarlo mediante soluciones a estos sub problemas.

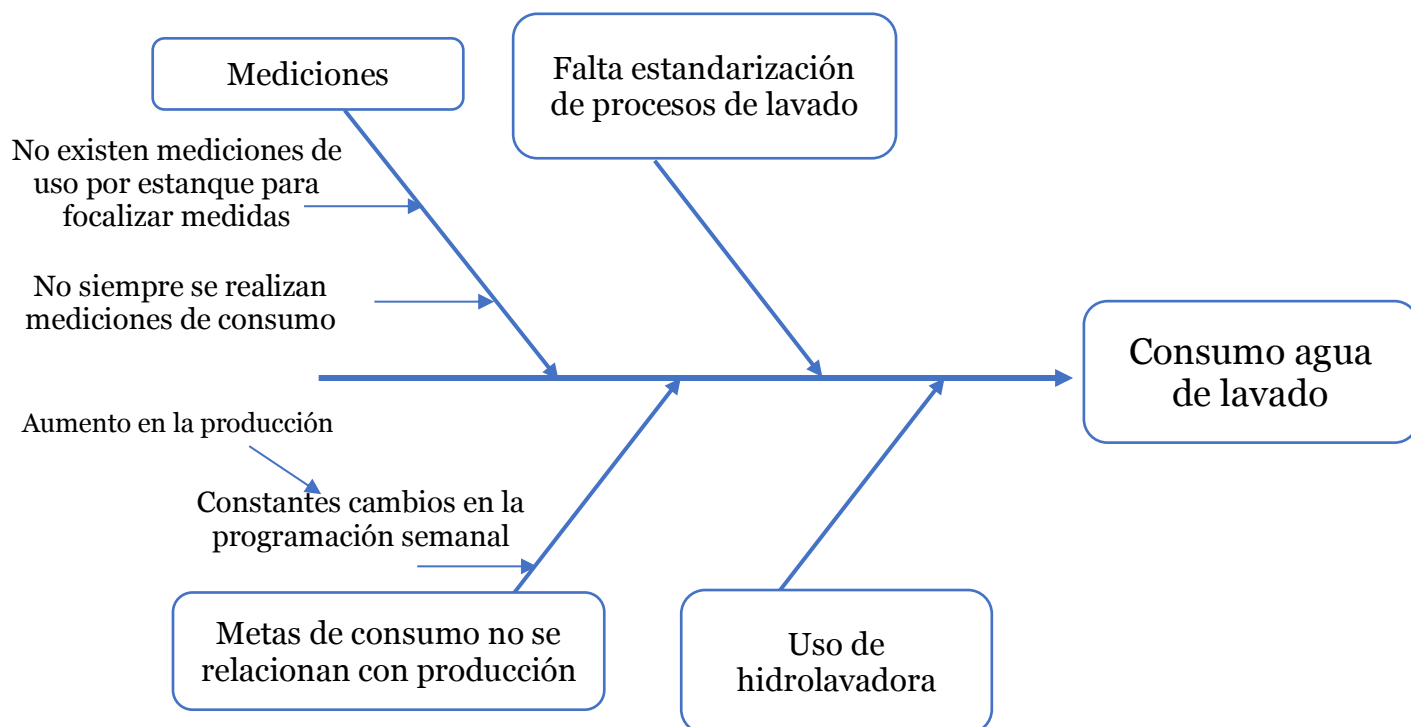


Figura 16: Diagrama de Ishikawa para el consumo de agua de lavado.

4.3.2. Vapor de agua, energía y emisiones de CO₂

Del análisis de los datos y en base a la observación del funcionamiento de la planta, se plantean 4 causas como principales del problema del alto uso del vapor y energía, y de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera:

- Eficiencia de la caldera.
- Registro del uso del vapor.
- Seguimiento de consumo del gas natural.
- Programación.

4.3.2.1. *Eficiencia de la caldera*

Según datos obtenidos por una auditoría externa [31], actualmente la planta opera con una caldera con capacidad de 5000 $\left[\frac{kg}{h}\right]$, para una demanda que no supera los 2000 $\left[\frac{kg}{h}\right]$. Este sobredimensionamiento provoca que la caldera opere con una baja eficiencia, ya que debe prenderse y apagarse según los requerimientos, y no puede operar continuamente. La eficiencia actual de la caldera es del 70%, menor al 98% que debería tener según el manual del fabricante [23]. Esta pérdida de eficiencia del 28% provoca un mayor consumo de metano, y por consecuencia más emisiones de dióxido de carbono.

4.3.2.2. *Registro de uso del vapor*

En la sala de calderas existe solamente un medidor general del vapor que se utiliza para toda la planta, no existiendo diferenciación para los procesos de vaporizado y calentamiento de los reactores. Esto no permite realizar una diferenciación en el uso, y definir directrices para estandarizar los procesos de limpieza de vaporizado, ya que el vapor que utiliza para el calentamiento está dado por la temperatura que requiere cada reacción y está determinado por la receta de preparación de los productos.

4.3.2.3. *Seguimiento del consumo del gas natural*

Al igual que el registro de vapor, no existe una medición de gas natural exclusiva para la planta de producción, sino que el medidor también incluye el consumo del resto de la empresa, en usos como calefacción. Esto aumenta la incertidumbre en el consumo de gas exclusivo para usos de producción y no permite cuantificar reducciones, si se aplicasen medidas.

4.3.2.4. Programación

El notable aumento en la producción y los pedidos de emergencia, alteran la programación normal de la producción, que se realiza con 4 días de anticipación al inicio de la semana. Debido a esto, deben agregarse productos a la planificación que no estaban considerados, lo que implica en ocasiones la realización de procedimientos de lavado no contemplados, aumentando el consumo de vapor y del agua de lavado.

En la empresa, existen las denominadas “campañas” de producción. Esto es la producción de un grupo de productos sucesivos, en un mismo reactor, que, al tener compatibilidad en sus características químicas, como pH y naturaleza del compuesto, minimizan los consumos de agua y vapor al tener que realizarse procesos más simples de limpieza, como enjuagado, urraqueado o incluso no realizar procedimiento de aseo. Debido a esto, programar para ventanas mayores de tiempo posibilita la creación de campañas de larga duración donde incluso puede evitarse lavar un reactor por una semana.

4.3.2.5. Diagrama de Ishikawa para el vapor, energía y dióxido de carbono

La Figura 17 muestra el diagrama de Ishikawa del consumo del agua de lavado. Al igual que para el agua de lavado, se presenta una síntesis de las causas del alto de consumo, separado en problemas de menor envergadura, y las causas de ellos.

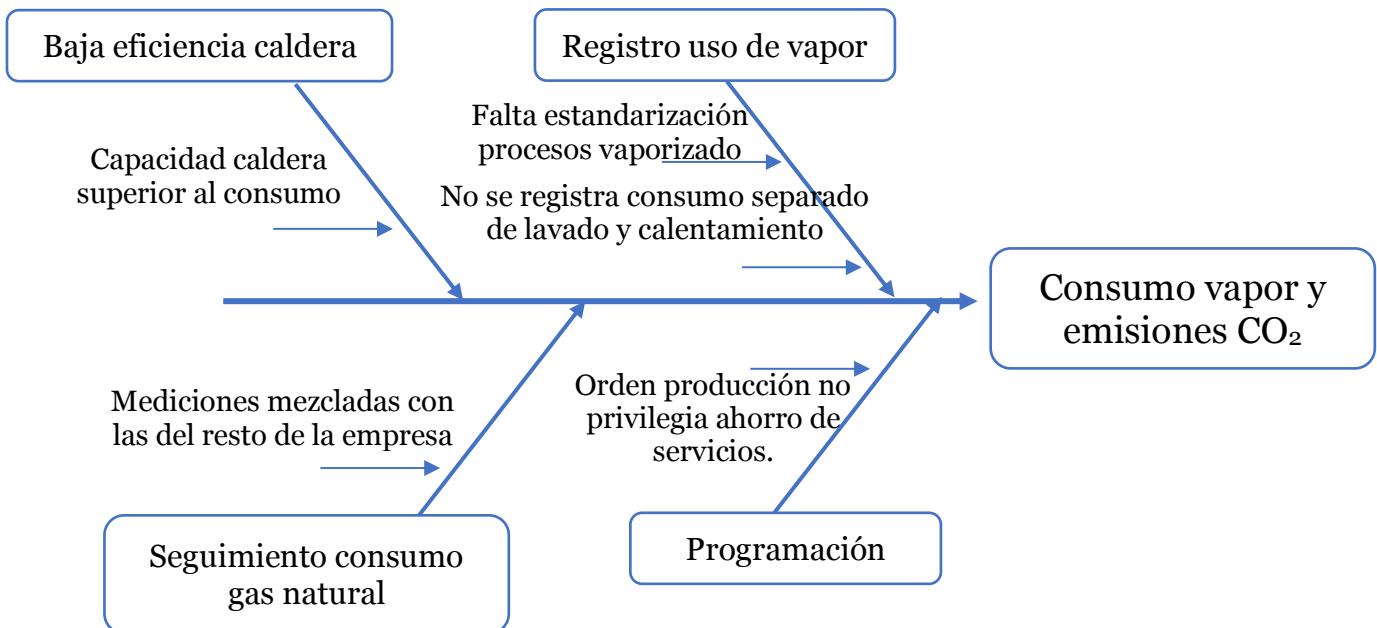


Figura 17: Diagrama de Ishikawa para el consumo de vapor y emisiones de dióxido de carbono.

4.4. Mejorar

4.4.1. Medidas para la reducción del consumo de agua de lavado

Las medidas para mejorar el consumo agua de lavado están divididas en 2 categorías: corto y mediano plazo.

Una medida a corto plazo se espera que se implemente o comience su estudio durante el período de desarrollo del trabajo y en un plazo máximo de ocho meses. Mediano plazo refiere a medidas que se implementen en un plazo máximo de 2 años.

Una medida de corto plazo es la estandarización de los procesos de limpieza que involucran agua de lavado. A pesar de que se poseen mediciones y estimaciones, los consumos en lavado están determinados en gran medida por la experiencia del operador, por lo que no existe un documento formal que establezca los flujos y tiempos que debe tomar la limpieza de cada reactor. Para realizar la estandarización, se propone comenzar con un registro de parte de los operadores o jefes de turno de cada uno de los lavados que se realicen a los diferentes equipos, y su duración en una planilla ubicada en el panel de los indicadores de desempeño. Con esto y las mediciones por turno de los volúmenes de agua que se utilizan, registrados en la planilla del KPI de agua de lavado, permitirán determinar un estándar que puede ser evaluado y modificado en el tiempo.

En el Anexo H se tiene una planilla de todos los procesos que deben estandarizarse en los reactores correspondientes. Los volúmenes obtenidos serán la base para ajustar las recetas en el tiempo y reducir los consumos. Actualmente están creadas 11 de las 26 Instrucciones de Trabajo (WI), 7 están en proceso de elaboración y 8 deben realizarse.

Otra medida que debe realizarse en el corto plazo es el control de agua lavado mediante la modificación del KPI de agua de lavado que existe actualmente y el registro de los lavados que se realizan (Anexo I). Esta medida se muestra en detalle en el apartado siguiente, correspondiente a la etapa de Controlar las medidas aplicadas.

Luego de la estandarización, en el mediano plazo, debe diseñarse e implementarse un sistema de revisión a las recetas de lavado, para que siempre estén actualizadas y puedan mantenerse o disminuir los consumos. Se propone realizar esta auditoría cada 6 meses, iniciando el mes de junio del 2018. Durante el período de preparación, deben identificarse las fuentes de datos, como los registros de lavados, el KPI de agua de lavado ubicado la pizarra de producción, observaciones in situ de los procedimientos, mediciones de flujos de agua por las cañerías y consulta a los operadores. En el Anexo J se propone un modelo de auditoría para ser aplicado en la planta en estudio.

Otra medida de mediano plazo tiene relación con la medida de consumos de agua de lavado exactos mediante la instalación de medidores de agua para cada reactor. Esto permitirá una mejor realización de las auditorías y eliminar la observación o estimación de los volúmenes utilizados. Actualmente, la empresa solo posee una medición total del agua que se utiliza para el lavado, y no posee equipos para medir el agua utilizada en cada procedimiento; esto permitiría crear y actualizar constantemente los protocolos de limpieza (WI) en orden de contribuir a la disminución del consumo.

Finalmente, también se propone comprar una segunda hidrolavadora, como respaldo frente a una falla de la primera o la compra de mangueras y una nueva pistola para que facilitar el acceso de todos los reactores a este equipo.

4.4.2. Medidas para reducción del consumo de vapor, consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono

Al igual que en las medidas del agua de lavado, estas se clasificarán en 2 categorías: corto y mediano plazo.

Dentro de las medidas de corto plazo, se encuentra la estandarización de los procesos de lavado de los reactores y vaporizado de camiones para sanitizarlos, antes de cargar un producto cosmético. Esta medida contribuye en el establecimiento de medidas certeras para poder modificar de forma realista los consumos de vapor mediante pruebas de nuevos estándares. Durante el período de estudio se identificaron todos los procesos que requieren el consumo de vapor. En el Anexo H se encuentra una lista de los procesos de que deben ser estandarizados.

Una medida de mediano plazo es el de la instalación de un medidor de consumo de vapor que se utilice para los procesos de limpieza. Esto significa una división de la línea principal de vapor que actualmente existe en dos líneas nuevas y la instalación del medidor en una de ellas. La diferencia entre el consumo total que se mide actualmente y la nueva medición de vapor utilizado para limpiar permitirá calcular el uso de vapor en la elaboración de los productos. La instalación de este medidor permitirá controlar el cumplimiento de las recetas y poder focalizar las medidas de reducción, debido a que el vapor utilizado en lavado de equipos es el objetivo para disminuir.

Otra medida de mediano plazo es el reemplazo de la actual caldera que posee la planta. El requerimiento actual de los diferentes procesos no alcanza la mitad de la capacidad total del equipo [31], por lo que se tiene que la capacidad es un 28% menor a la indicada por el fabricante. Es por eso por lo que se hace necesario el cambio de la actual caldera por una de menor capacidad, acorde a las necesidades de la empresa. Este cambio disminuirá el consumo de energía asociada al vapor y el combustible utilizado, resultando en una menor emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y ahorro en los gastos operacionales.

Si se toma como referencia la media móvil del 2017, al aumentar la eficiencia de la caldera a la que indica el fabricante, se alcanzaría la meta de reducción al 2025 tanto en las emisiones de dióxido de carbono como en el consumo de energía asociado al vapor de agua, alcanzándose rendimientos de $33,67 \left[\frac{kg \ CO_2}{t \ producto} \right]$ y $170,22 \left[\frac{MJ}{t \ producto} \right]$ respectivamente.

Finalmente, la igual que en el caso del consumo de agua de lavado, debe actualizarse el Indicador de desempeño a uno dinámico y acorde a la producción planificada.

4.4.3. Resumen medidas

La Tabla 9 muestra un resumen de las medidas propuestas, los insumos que involucra directamente, su horizonte temporal y su impacto. Las medidas de consumo energético y emisiones de dióxido de carbono están implícitas y relacionadas directamente con las del vapor, ya que su cálculo depende de este consumo. Existe una relación entre los indicadores de agua y vapor en los lavados o enjuagues con agua caliente, ya que se utiliza vapor para calentar el agua con que se lavan; es por eso que en algunas medidas ambos indicadores se reportan.

En la Tabla también se presenta una columna de impactos previsto, en donde se clasificó a las medidas en bajo, medio y alto impacto. Una medida de bajo impacto es aquella que implica cambios en el registro y presentación de datos de consumo o compra de equipos que no implican una disminución directa del consumo de alguno de los insumos estudiados. Una medida de impacto medio repercute en equipos involucrados en el proceso productivo y en la forma en que se realizan los procedimientos. Finalmente, medidas de alto impacto son aquellas que directamente generan una disminución en el consumo de alguno de los insumos que permiten alcanzar las metas establecidas al año 2025. Sin embargo lo anterior, la inversión económica que requiere cada una de las medidas (no estimadas en este estudio) podría modificar el impacto de cada una de ellas, y por tanto la prioridad que la empresa puede dar a la implementación de cada una de las medidas. Por ello es necesario incluir esta variable para la toma final de decisiones.

Finalmente, la última columna presenta la problemática declarada en la sección 4.3 que soluciona la cada una de las medidas propuestas. No se menciona una medida respecto de la programación de la producción debido a que compete a aspectos relacionados con la demanda de productos, gestión de materias prima o uso de sistemas computacionales, no abordados en el estudio. Esto abre una posibilidad de mejora en tanto exista un trabajo sobre gestión de inventarios o pronósticos de demanda.

Tabla 9: Resumen de medidas propuestas.

Medida	Insumo involucrado	Horizonte temporal	Impacto	Impacto previsto	Problemática que soluciona
Cambio de caldera	Vapor	Mediano plazo	Aumento en un 28% de eficiencia disminuye consumo de gas y de emisiones de CO ₂ .	Alto	Eficiencia de la caldera
Instalación medidor vapor por uso	Vapor	Mediano plazo	Mejorar mediciones de uso de vapor y diferenciación según su uso.	Medio	Registro uso de vapor
Estandarización de procesos de limpieza y uso vapor	Agua de lavado y vapor	Corto plazo	Permite controlar el uso del vapor y realizar seguimiento de medidas de reducción.	Medio	Estandarización
Actualización de actuales KPI de agua de lavado y vapor	Agua de lavado y vapor	Corto plazo	Muestra a operadores metas reales de consumo a cumplir y los incluye en el proceso de mejora continua.	Bajo	Establecimiento de metas de consumo
Registro de lavados a reactores	Agua de lavado y vapor	Corto plazo	Controlar el uso de agua de lavado y mejorar el documento de KPI agua de lavado.	Bajo	Establecimiento de metas de consumo
Medición de agua de lavado en cada reactor	Agua de lavado y vapor	Mediano plazo	Tener mediciones exactas de los consumos por reactor y focalizar las medidas a procesos y equipos específicos.	Medio	Mediciones
Compra de una segunda hidrolavadora o mejorar acceso de equipos a actual	Agua de lavado	Corto plazo	Asegurar e incentivar el uso de la hidrolavadora para procesos de limpieza simple o como complementos para otros más complejos.	Bajo	Uso de la hidrolavadora
Implementación sistema auditorías a WI	Agua de lavado y vapor	Mediano plazo	Mejora continua de los procesos involucrados con el uso de vapor y agua de lavado.	Medio	Estandarización

4.5. Controlar

4.5.1. Agua de lavado

Para controlar el consumo de agua de lavado en la planta, debe realizarse una estimación certera del flujo que va a utilizarse, tomando en consideración la planificación de la producción. Esto con el fin de que los operadores intenten ajustarse a una meta semanal real y utilizar de mejor manera el recurso.

Para ello, se propone una estimación dinámica, actualizada semanalmente y realizada en base a los productos que se elaborarán y los cambios en la producción de cada uno de los reactores. Se utilizará la programación de la producción y se considerarán todos los tipos de lavado descritos en la sección 4.2. Además, se utilizarán matrices en que se identifica el tipo de lavado que debe realizarse para cambios de productos para todos los reactores. Estos datos pueden encontrarse en el Anexo K.

Actualmente, se estima un consumo semanal de 20 [m³], con crecimiento lineal, y se muestra un gráfico a los operadores que deben ir llenando diariamente, con el consumo acumulado. La Figura 18 muestra un ejemplo para una semana cualquiera. La recta corresponde al consumo ideal de agua de lavado, y las barras son las mediciones reportadas por los operadores al término de cada turno. Este método no incluye los lavados completos de los equipos, por lo que existen semanas en que está subestimado el consumo.

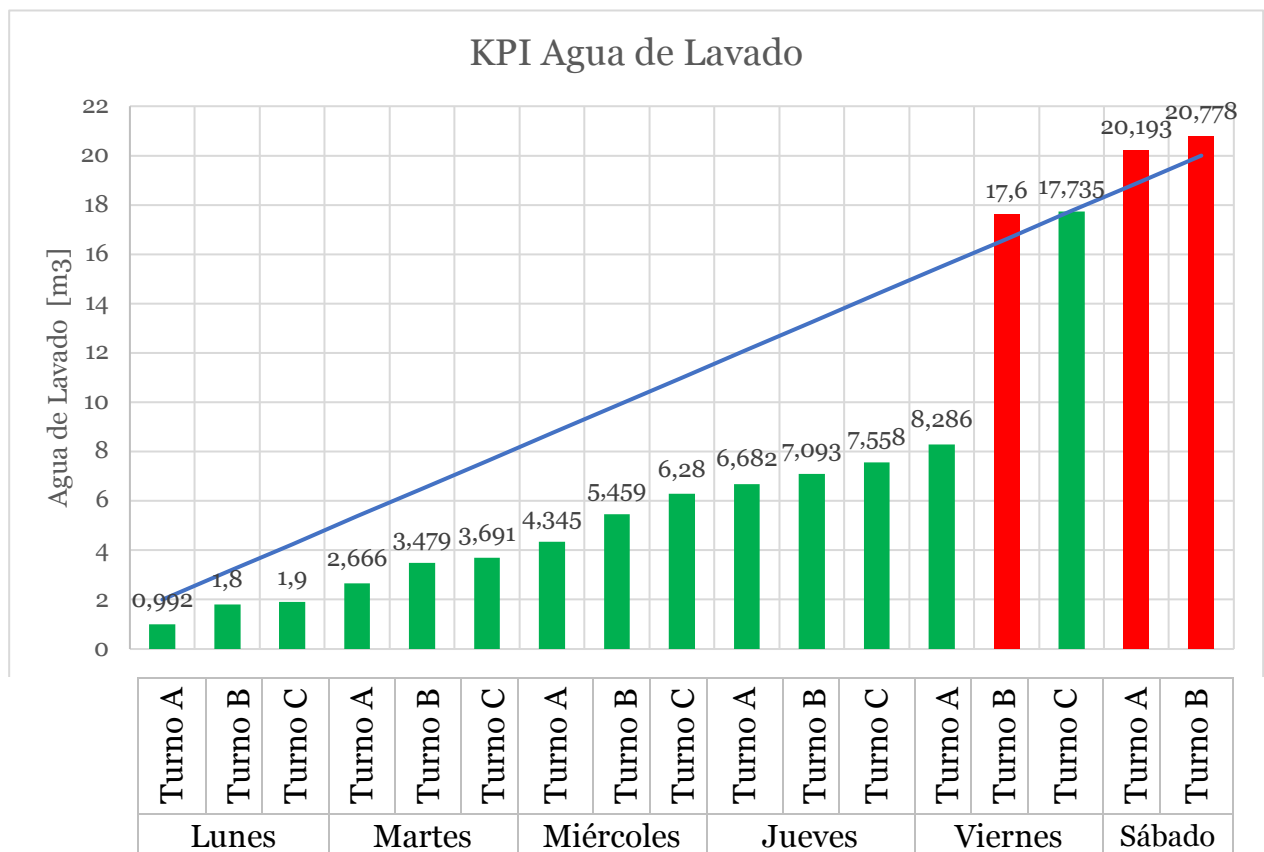


Figura 18: Gráfico actual Indicador de Desempeño de Agua Lavado para la tercera semana de diciembre de 2017.

Para realizar la estimación del uso del agua de lavado, se requiere conocer el volumen de agua que se utiliza en cada procedimiento de lavado, para cada reactor. Adicionalmente, es necesario contar con la planificación semanal de producción. Con esto, se puede determinar qué tipo de lavado se realizará en cada uno de los reactores y calcular el volumen de agua que se utilizará diariamente. También se considerará un consumo base diario de 500 litros de agua para el lavado de mangueras y equipos auxiliares. Con los datos de la programación y el tipo de lavado determinado, se puede determinar el procedimiento que se realizará en cada turno de la semana para obtener la estimación de agua a utilizar para el período siguiente. Cuando no existen lavados programados para el turno, se considerará un consumo base de 0,5 [m³] para limpieza de cañerías y pérdidas. Si existiesen, se suma solamente 0,3 [m³] como consumo base, ya que parte del consumo estimado incluye limpieza de mangueras y algunas pérdidas.

Este cálculo podría mejorarse en el tiempo en la medida que existan mediciones más precisas de los flujos involucrados y del mejoramiento continuo de las Instrucciones de trabajo de los procesos de limpieza.

El método dinámico que se propone da como resultado un gráfico que se muestra en el Figura 19. Las barras son las mismas utilizadas anteriormente, ya que representan el consumo medido, mientras que la meta, representada por la recta sufrió modificaciones. Adicionalmente se compara con el pronóstico actual. El detalle de la construcción del método se encuentra en el Anexo L.

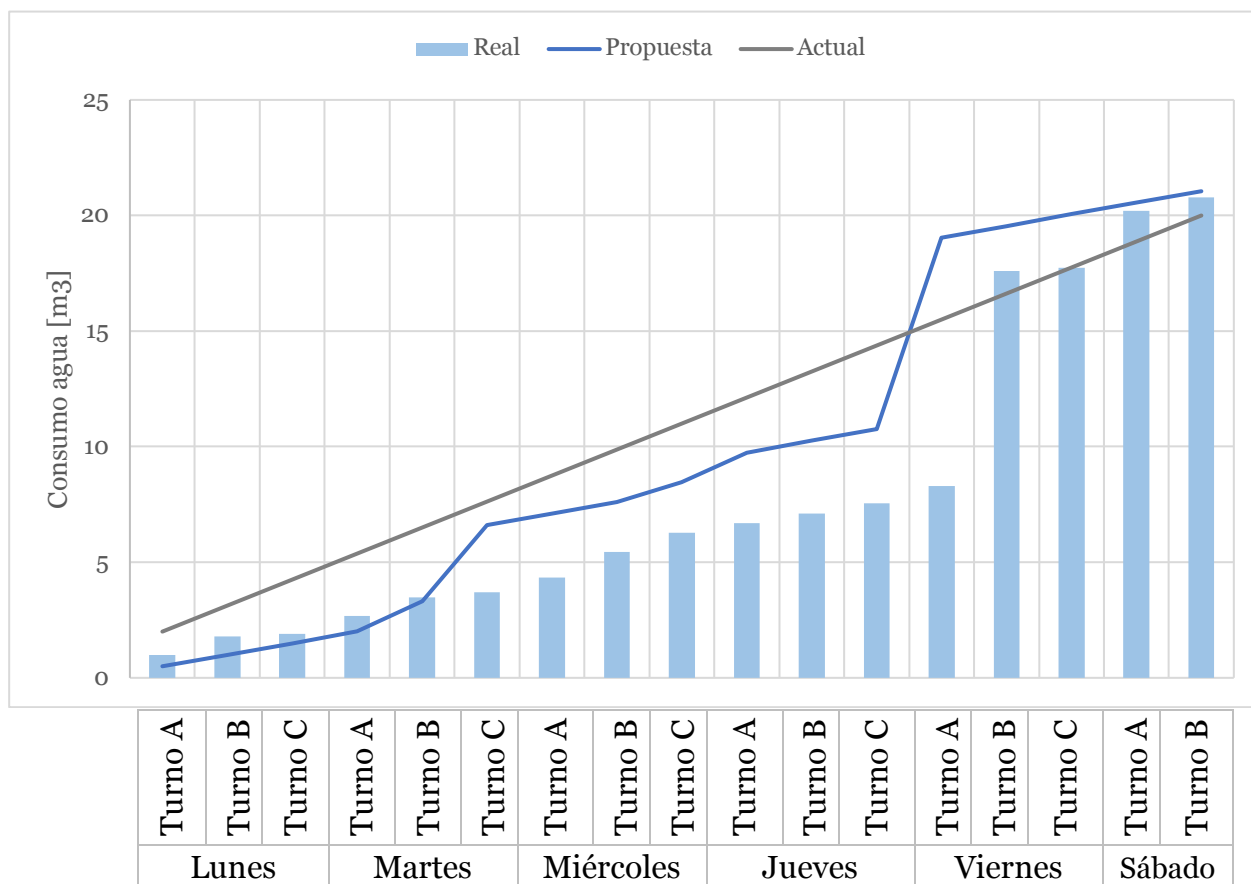


Figura 19: Nuevo modelo predictivo y comparación con los datos reales y el actual.

Se realizó una evaluación de este método durante 5 semanas consecutivas en el período de pasantía en la empresa, y se comparó con el modelo utilizado actualmente. La Tabla 9 muestra los consumos proyectados y reales de agua de lavado y la efectividad de cada método. En tanto, la Figura 20 grafica las diferencias con la medición real de cada semana. El detalle de los datos y estimaciones de cada semana pueden encontrarse en el Anexo M.

De las pruebas realizadas se desprende que la metodología propuesta es más certera para predicción del consumo del agua e lavado semanal. Las diferencias en el cumplimiento se debieron principalmente a cambios en la programación de la producción para atender un pedido urgente o una falta de materia prima. Sin embargo, considerando el período completo de estudio, estos cambios en el orden de la producción desaparecen, teniendo una diferencia total entre la medición real y predicha del 3%. Por otro lado, las metas actuales de consumo de agua de lavado siempre fueron más bajas que la medición real, y considerando el período completo fueron un 48% más bajas, por lo que pierde utilidad este indicador para tomar alguna decisión y sólo es útil como un registro de consumo.

Tabla 10: Evaluación modelo de consumo de agua de lavado.

Semana	Meta actual [m ³]	Meta propuesta [m ³]	Medición real [m ³]	Diferencia actual [%]	Diferencia de propuesta [%]
1	20	21,05	20,78	-4%	1%
2	20	59,40	66,71	-70%	-11%
3	20	30,20	31,22	-36%	-3%
4	20	59,85	53,42	-63%	12%
5	20	29,10	21,10	-5%	38%
Total período	100	199,60	193,23	-48%	3%

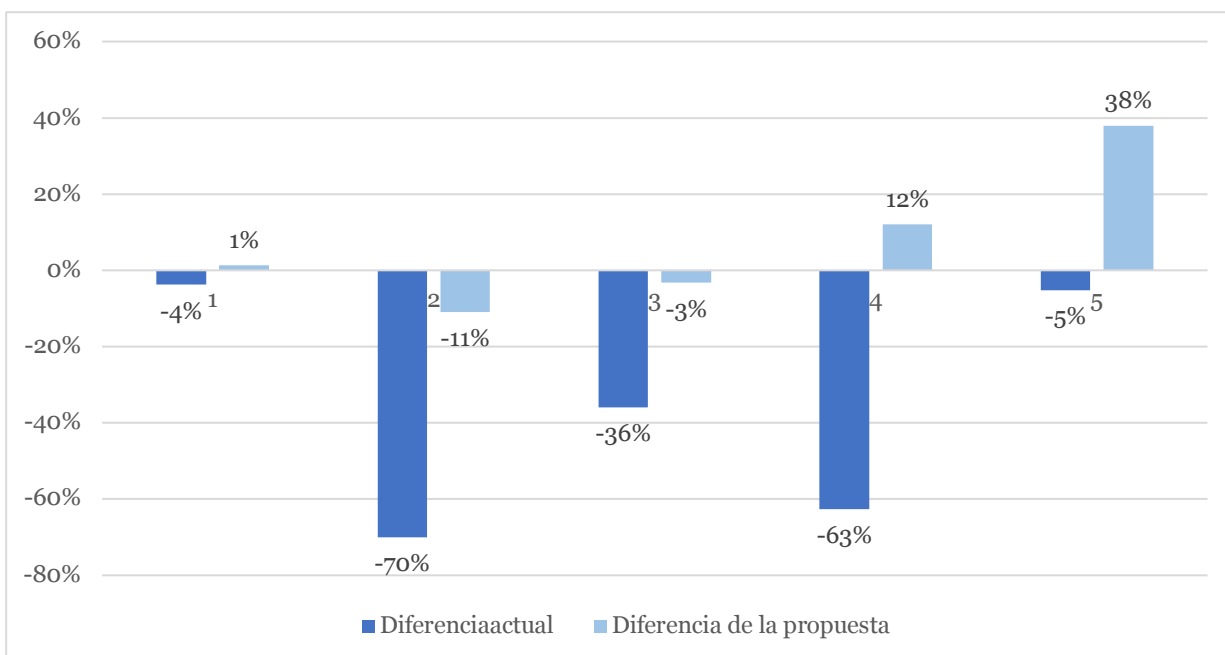


Figura 20: Diferencia de metas de consumo de agua de lavado respecto a consumo real.

4.5.2. Vapor

Para controlar que el consumo de vapor de la planta, se propone la actualización del indicador de desempeño de vapor que se utiliza. Actualmente se establece una meta constante para cada semana de 20 [t], que no sufre variaciones en función de la producción. Para la aplicación, debe cuantificarse la masa de vapor que se utiliza en cada proceso en que está involucrado el vapor, y en conjunto con la programación poder realizar una estimación del consumo semanal esperado. Esta medida se relaciona directamente con la estandarización, por lo que es aconsejable realizarlas en paralelo o de manera consecutiva.

Adicionalmente, y luego de que sea estandarizado el proceso de limpieza con vapor y de lavado con agua caliente, se propone realizar auditorías periódicas al consumo de vapor, con el fin de retroalimentar las medidas de reducción y trabajar en una actualización de los métodos y recetas de lavado.

La Figura 21 muestra la secuencia de pasos que se sugiere realizar para el establecimiento del Indicador de Desempeño, similar al realizado para construcción del indicador de agua de lavado.



Figura 21: Metodología de construcción de Indicador de Desempeño para el consumo de vapor.

4.6. Medidas implementadas

Dentro de las medidas propuestas, se ha implementado el gráfico del nuevo KPI de agua de lavado. Se capacitó al ingeniero de procesos de la planta sobre su construcción y operación, y se explicó cómo mejorar el instrumento a medida que se vaya completando la estrategia con la estandarización y auditorías.

Además, se comenzó con la estandarización de los procesos de lavado de reactores, revisando las Instrucciones de Trabajo existentes y actualizándolas. También se identificó aquellas que no estaban terminadas y las restantes por elaborar. Toda esta información se encuentra en el Anexo H y en los documentos internos de la empresa.

Finalmente, se elaboraron los documentos de registro de lavados y auditorías para los procedimientos de lavado. A pesar de que no fueron implementados en el período de estudio, están disponibles para el uso del personal pertinente.

4.7. Calendario de implementación

A continuación, se presenta una planificación temporal de aplicación de las diversas medidas propuestas. La Tabla 11 muestra cada medida y el período en que se esperaría sean aplicadas. Esta calendarización responde a criterios de priorización de medidas dada su urgencia o base para la implementación de medidas más intensivas tanto en recursos económicos como humanos. Se espera que en un período de 22 meses las medidas puedan ser implementadas en su totalidad. Esto permite un espacio de 3 años para evaluar estas medidas e implementar otras con el fin del cumplimiento de las metas propuestas para ese año.

Tabla 11: Propuesta de calendario de implementación de medidas.

Medida	2018												2019											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Cambio de caldera													■	■	■									
Instalación medidor vapor por uso									■	■														
Estandarización de procesos uso vapor		■	■	■																				
KPI vapor					■	■																		
Estandarización procesos de limpieza		■	■	■																				
KPI de agua de lavado	■	■																						
Registro de lavados a reactores				■																				
Medición de agua de lavado en cada reactor																						■	■	■
Compra de una segunda hidrolavadora					■																			
Implementación sistema auditorías a WI						■	■						■						■					

5. Discusiones y recomendaciones

A pesar de que el objetivo inicial era plantear medidas concretas para la reducción de consumo de vapor de agua y agua de lavado, la aplicación de la metodología DMAIC reveló que existían falencias en las fases iniciales de definiciones y medidas. Por diferentes problemas de falta de personal y coordinación entre las diferentes jefaturas, algunos datos no se registraban correctamente y en los tiempos estipulados para ellos, por ejemplo, en las planillas de KPI de agua de lavado y vapor. Es por aquello que el foco debió cambiarse a organizar y ordenar la información disponible, y buscar alternativas de medición de datos importantes que no se estuvieran estudiando. También era relevante la evaluación de lo que se estaba realizando en términos de procedimientos de los lavados, y generar formas de evaluar y mejorar éstos, antes de tomar una decisión que requiera una inversión económica.

La empresa posee un área dedicada a la mejora continua de los procesos, por lo que en el futuro, se espera que el análisis realizado en este documento sea considerado para la toma de medidas concretas de reducción, con una base confiable de datos y evaluaciones de los procesos que se realizan.

Además del compromiso institucional por la sustentabilidad y la existencia de un área de mejora continua, existe una total apertura de parte de los operadores de la planta en capacitarse y formarse en el uso eficiente de los recursos estudiados. Es por ello que debe aprovecharse y comenzar a implementar los cambios lo antes posible con la participación de todos los actores involucrados. Este punto también impacta de manera positiva en la vida personal de cada trabajador y en la sociedad, al generar un sentido de responsabilidad con el medio ambiente en que están inmersos, necesario para enfrentar los desafíos medioambientales del siglo XXI.

Un aspecto importante que generó incertidumbre y diferencias en las estimaciones de consumo de agua de lavado fue la programación de la producción. Debido a pedidos de urgencia y problemas de coordinación con las materias primas, se realizaron constantes de cambios que alteran la producción y puede llevar a la fabricación de productos que necesiten de lavados completos de reactores, en desmedro del incentivo de la fabricación a través de campañas. Se sugiere que la programación se realice en una ventana de tiempo mayor a los 7 días, por ejemplo, de dos semanas, para coordinar de mejor manera la necesidad y el stock de materias primas, los camiones de carga y descarga de productos para poseer personal disponible en caso de que surjan imprevistos propios del funcionamiento de una planta de producción. Además, una programación anticipada permitiría también el establecimiento de metas de consumo para esos períodos, por lo que resulta crítica la implementación de los nuevos KPI para ligar estas metas con la producción. Esto también permite realizar predicciones y correcciones a las medidas propuestas e implementadas.

Finalmente, se hace necesario realizar una evaluación económica de las medidas y una revisión por otras áreas de la empresa para un estudio completo de su factibilidad, y que no se contraponga con otros proyectos de la empresa o que complementen otros que puedan estar en estudio.

6. Conclusiones

El estudio realizado y las medidas propuestas se han convertido en una estrategia para la posterior implementación de medidas operativas e intervenciones en el proceso productivo per se. Se espera que los registros y metodologías propuestos sean la base para una mejora continua detallada del proceso y los procedimientos que se realizan dentro de la planta de OMS.

En síntesis, la metodología propuesta es una estrategia para el cumplimiento de las metas que la empresa ha establecido al 2025. Si se implementaran a más tardar el año 2019, como es sugerido, existe un período de 6 años para que medidas, como el cambio de caldera propuesto, mejoren la eficiencia y disminuyan el consumo del vapor y agua de lavado.

La estrategia consta de 5 pilares (Figura 22) para la consecución de los objetivos ambientales impuestos: el correcto registro de lavados y consumos, la estandarización de los procesos que involucran agua de lavado y vapor, auditorías constantes para revisión de los estándares, el control y establecimiento de metas de reducción intermedias, y la ejecución de acciones concretas utilizando toda la información disponible.

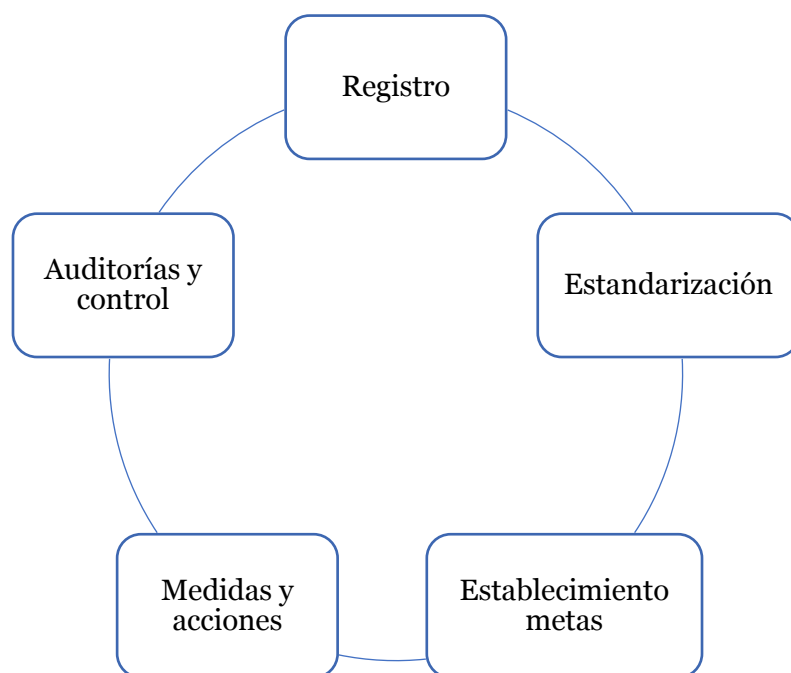


Figura 22: Estrategia de acción para el cumplimiento de metas medioambientales.

El registro permitirá tener a disposición datos organizados periódicamente para ser utilizados en futuras implementaciones del método Lean Seis-Sigma y para realizar comparaciones y medir grados de avance. Estandarizar los procesos unirá la experiencia de los operadores expertos de la planta con las mediciones de indicadores para tener procesos de limpieza con consumos controlados de agua de lavado y de vapor. Establecer metas permitirá que todo el equipo de trabajo conozca el trabajo que se está realizando y sea parte de él, mediante acciones de diversas envergaduras y aplicando medidas diseñadas por los ingenieros de la planta o los jefes de turno. Finalmente, un sistema de auditorías y control permitirá utilizar las mediciones para evaluar las medidas implementadas y generar un análisis para la toma de futuras decisiones como el cambio o compra de equipos nuevos, cambios de tecnología o modificaciones a esta misma metodología. La identificación de estos 5 aspectos permitirá a la empresa focalizar sus medidas y realizar de manera acotada futuros análisis de causa raíz dada la identificación de las acciones principales que impactan en los consumos de los insumos estudiados.

Respecto al procedimiento que se realizó en este trabajo, la aplicación de la metodología Seis-Sigma permitió la separación de los problemas de consumo en otros menos complejos, permitiendo analizar sus orígenes y tomar medidas al respecto. Es por esta razón que la forma de la Figura 22, con la metodología de trabajo específica que se propone para la empresa, tiene similitud con la Figura 6 donde se explica el método DMAIC.

Finalmente, dado el carácter de las medidas propuestas y lo acotado del período de tiempo de estudio, no se pudo cuantificar el impacto de éstas en la reducción de los consumos de agua de lavado y vapor. La mayoría de las medidas tienen como objetivo cambios en la forma de trabajo y generación de datos que ayuden a tomar decisiones en el futuro, quedando como proyección una evaluación económica.

7. Bibliografía

- [1] GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. Cambio climático 2013: bases físicas. [en línea]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf> [consulta: 21 junio 2017].
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [3] ENVIROMENMENTAL PROTECTION AGENCY. Learn about sustainability. [en línea] <<https://www.epa.gov/sustainability/learn-about-sustainability#what>> [consulta: 9 julio 2017].
- [4] GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad. [en línea] <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf> [consulta: 21 junio 2017].
- [5] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Paris 2015 Conferencia para el Cambio Climático COP21-CMP11. [en línea] <<http://www.parispledgeforaction.org/wp-content/uploads/2015/08/Paris-Pledge-for-Action-Spanish.pdf>> [consulta: 11 junio 2017].
- [6] COMISIÓN EUROPEA. Acuerdo de París, puntos principales: papel de las ciudades, regiones y las administraciones locales. [en línea] <https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es> [consulta: 11 junio 2017].
- [7] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Objetivos de desarrollo sostenible: Objetivo 12. [en línea] <<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>> [consulta: 10 junio 2017].
- [8] CLARIANT®. Compañía. [en línea] <<https://www.clariant.com/es/Company>> [consulta: 03 enero 2018]
- [9] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Agua. [en línea] <<http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>> [consulta: 02 enero 2018]
- [10] GUERRA ROSALES, Nicolás Alonso. Generación Eléctrica mediante Gasificación por Plasma de Residuos Sólidos Municipales. Universidad de Chile. 2016.

- [11] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Ley 20.290: Establece Marco Para La Gestión De Residuos, La Responsabilidad Extendida Del Productor Y Fomento Al Reciclaje. [en línea] <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1090894>> [consulta: 20 julio 2017]
- [12] ROJAS, Lorena. Propuesto y evaluación de estrategias de minimización del uso de agua en la producción de jugos sin aditivos. Universidad de Chile. 2016.
- [13] PENN STATE COLLEGE OF ENGINEERING. Lean Manufacturing. [en línea] <<http://www.engr.psu.edu/cim/ie450/ie450ho1.pdf>> [consulta: 19 febrero 2018]
- [14] UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS. Sistema de Calidad 6 Sigma. [en línea] <http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/indata/v04_n1/sistema.html> [Consulta: 20 julio 2017]
- [15] YEPES, PELLICER. Aplicación de la metodología Seis-Sigma en la mejora de resultados de los proyectos de construcción. [en línea] <<http://personales.upv.es/vyepesp/05YPX01.pdf>> [consulta: 21 junio 2017].
- [16] CRUZ, ARRONA. Implementación Seis-Sigma. [en línea] <<http://acacia.org.mx/busqueda/pdf/PO7T1-1.pdf>> [Consulta: 10 junio 2017]-
- [17] BRIZUELA, E. y ROMANO S.D. Unidad 1: combustión. Universidad de Buenos Aires. 2006.
- [18] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Composición gaseosa y aire puro. [en línea] <http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/atm/atm06.htm> [Consulta: 08 enero 2018]
- [19] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. La combustión: calderas. 2014. [en línea] <<http://www.upv.es/entidades/DTRA/infoweb/dtra/info/U0675364.pdf>> [Consulta: 09 enero 2018]
- [20] GREEN, Don W. y PERRY, Robert H. Perry's Chemical Engineers Handbook. 8ª ed. McGraw Hill, 2008, 2-145p.
- [21] GREEN, Don W. y PERRY, Robert H. Perry's Chemical Engineers Handbook. 8ª ed. McGraw Hill, 2008, 2-413p.
- [22] ENERGÍAS INDUSTRIALES S.A. Esquema caldera pirotubular. [en línea] <<http://www.eisa.cl/scontenido.php?seccion=7&subseccion=2&contenido=13>> [Consulta: 17 enero 2018]
- [23] LOOS INTERNATIONAL. Steam boiler Manufacturing Range. Gunzenhausen, Alemania, 16p.

- [24] THERMAL ENGINEERING. Análisis de la eficiencia en calderas. [en línea] <http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo___eficiencia_en_calderas.pdf> [consulta: 19 enero 2018]
- [25] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Objetivos de desarrollo sostenible: Objetivo 16. [en línea] <<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/peace-justice/>> [consulta: 10 junio 2017]
- [26] MUÑOZ Ignacio y OSANDÓN Luis. La didáctica de la historia y la formación de ciudadanos en el mundo actual. Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos. Santiago de Chile, 2013, 274p.
- [27] ROSSINI, Frederick D. The Heats of Combustion of Methane and Carbon Monoxide. [en línea] <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/6/jresv6n1p37_A2b.pdf> [Consulta: 15 enero 2018]
- [28] AGENCIA CHILENA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. Capacidades caloríficas de distintos combustibles y factores de conversión de unidades. [en línea] <<http://www.drtoro.cl/ACHEE/documentos/recursos/DireccionAnexo2.pdf>> [Consulta: 26 enero 2018]
- [29] CLARIANT®. Environmental KPI. 2013, Santiago de Chile.
- [30] NEDGIA S.A. Características del gas natural. [en línea] <<http://www.gasnaturaldistribucion.com/es/conocenos/quienes+somos/historia+del+gas/1297104955871/caracteristicas+del+gas+natural.html>> [Consulta: 09 enero 2018]
- [31] CLARIANT®. Auditoría energética y evaluación de pre factibilidad de medidas de Eficiencia Energética. 2016, 3p.
- [32] CHANG, Raymond. Química General. McGraw Hill, 7ma edición, 2002, 3p.
- [33] UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO. Física estadística y termodinámica. [en línea] <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/fusion/fusion.htm>> [Consulta: 31 enero 2018]

8. Anexos

Anexo A: mediciones anteriores y metas del 2013.

La Figura 23 muestra la producción anual en el período 2013 al 2017. En ella se puede observar que la producción se mantiene constante hasta el año 2016, y luego se produce un aumento del 42%. En tanto, la Tabla 12 muestra los volúmenes de agua de lavado consumido en cada año y la masa de vapor utilizado, con los respectivos rendimientos. Esta es la base para el cálculo de las metas de reducción al año 2025.

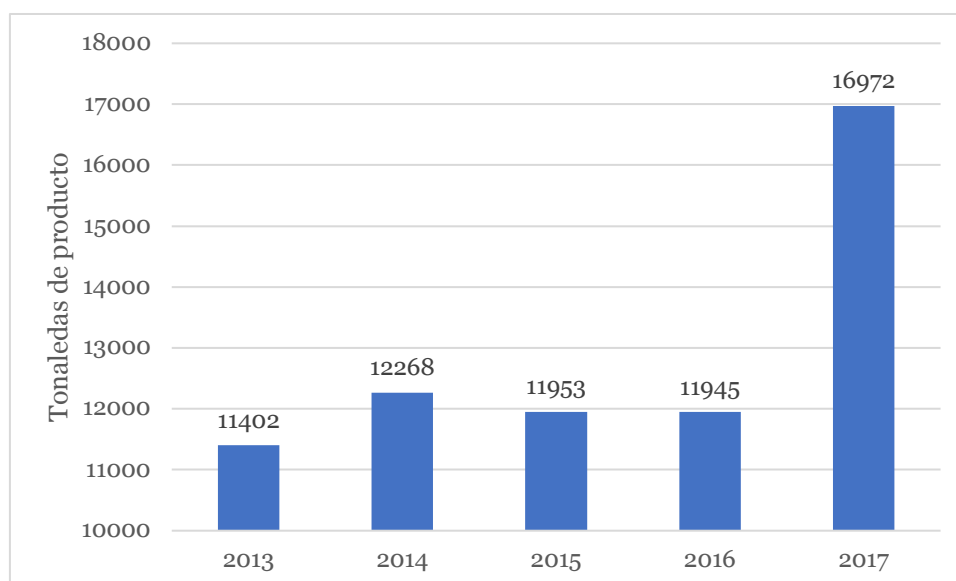


Figura 23: Producción del período 2013 al 2017.

Tabla 12: consumos y rendimientos del agua de lavado y vapor.

Año	Producción [t]	Lavado Osmosis [m^3]	Agua dura de lavado [m^3]	Vapor [ton]	$R_{w,a}$ [$\frac{kg\ agua}{t\ producto}$]	$R_{v,a}$ [$\frac{kg\ vapor}{t\ producto}$]
2013	11.402	1.341	1.169	993,0	220,14	87,09
2014	12.268	1.341	1.149	760,2	202,97	61,97
2015	11.953	1.341	1.089	1.034,7	203,30	86,56

Se define el rendimiento de vapor de agua como

$$R_{v,a} = \frac{V_a}{P_a} \cdot 1.000 \quad (\text{A-1})$$

Donde:

$R_{v,a}$: rendimiento del vapor en el año a $\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$.

P_a : producción del año a [t].

Con esto, el rendimiento para el año 2013 se calcula:

$$R_{v,2013} = \frac{993[t \text{ vapor}]}{11.402 [t \text{ producto}]} \cdot 1.000 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ vapor}} \right] = 87,09 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right] \quad (\text{A-2})$$

Análogamente, para el rendimiento del agua de lavado se define:

$$R_{w,a} = \frac{A_a}{P_a} \cdot 1.000 \quad (\text{A-3})$$

Donde:

$A_{t,a}$: consumo total de agua para lavado en el mes t del año a y se calcula:

$$A_{t,a} = F_{lavado,osmosis} + F_{lavado,dura} \quad (\text{A-4})$$

Se calcula entonces, por ejemplo, el rendimiento para el 2013 de la siguiente forma:

$$R_{w,a} = \frac{(1.341 + 1.169)[m^3 \text{ agua}]}{11.402[t \text{ producto}]} \cdot 1000 = 220,14 \left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right] \quad (\text{A-5})$$

A partir de estos datos obtenidos, y considerando una baja proyectada del 35% del consumo de agua y del 30% en el consumo de energía (vapor), se tiene que las metas de reducción al año 2025 se calculan de la siguiente forma:

$$T_w = 0,65 \cdot 220,14 = 143,09 \left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right] \quad (\text{A-6})$$

$$T_v = 0,70 \cdot 135,41 = 60,96 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right] \quad (\text{A-7})$$

Donde:

T_w : rendimiento objetivo para el agua de lavado al año 2025.

T_v : rendimiento objetivo para el vapor al año 2025.

Dado que, en el año 2013, 2014 y 2015, no se consideraba parte del agua de osmosis como de lavado, se estimó que, al ser similares las producciones de estos años con la del 2016, el consumo de agua fue el mismo. Los datos de consumo de agua dura y osmosis del 2016 se encuentran en el anexo H.

Anexo B: datos de medición de agua

i. Agua desmineralizada

Las Tablas 13 y 14 muestran el consumo medido de agua desmineralizada, o de osmosis, los años 2016 y 2017. Se incluye el volumen utilizado, en total, que muestra le medidor, el agua utilizada en el proceso y la utilizada en otro proceso productivo (pigmentos). Con estos datos, se calcula el agua de osmosis que se utiliza en lavado, en litros, según la ecuación (B-1).

$$F_{lavado,osmosis} = \left(F_{total,osmosis} - (F_{proceso,osmosis} + F_{pigmentos,osmosis}) \right) \cdot 1000 \quad (B-1)$$

Por ejemplo, para el mes de febrero de 2016, se tiene:

$$F_{lavado,osmosis} = (318 - (236,57 + 30)) \cdot 1.000 = 51.432 [l] \quad (B-2)$$

Tabla 13: Uso de agua desmineralizada en proceso, año 2016.

Mes	$F_{total,osmosis}$ [m ³]	$F_{proceso,osmosis}$ [m ³]	$F_{pigmentos,osmosis}$ [m ³]	$F_{lavado,osmosis}$ [l]
Enero	244	178,15	29	36.847
Febrero	318	236,57	17	64.432
Marzo	342	249,27	28	64.730
Abril	276	173,82	28	74.178
Mayo	381	198,73	30	152.273
Junio	271	181,42	28	61.585
Julio	278	142,52	31	104.478
Agosto	289	144,63	26	118.375
Septiembre	382	236,00	29	117.004
Octubre	384	215,06	33	135.936
Noviembre	657	329,70	28	299.301
Diciembre	470	322,67	35	112.329
Total 2016	4.292	2.608,53	342	1.341.468

Tabla 14: Uso de agua desmineralizada en proceso, año 2017.

Mes	$F_{total,osmosis}$ [m ³]	$F_{proceso,osmosis}$ [m ³]	$F_{pigmentos,osmosis}$ [m ³]	$F_{lavado,osmosis}$ [l]
Enero	570	430,09	50	89.912
Febrero	461	366,12	48	46.876
Marzo	621	498,21	32	90.791
Abril	622	503,75	58	60.246
Mayo	641	425,27	51	164.731
Junio	637	459,70	61	116.301
Julio	476	466,64	0	9.365
Agosto	656	440,06	57	158.944
Septiembre	384	289,89	50	44.110
Octubre	555	418,88	59	77.120
Noviembre	594	371,13	51	171.870
Diciembre	631	479,54	50	101.460
Total 2017	6.848	5.149,27	567	1.131.726

ii. Agua dura

Las Tablas 15 y 16 muestran el consumo de agua dura utilizada para lavado los años 2016 y 2017.

Tabla 15: Consumo de agua dura utilizada para lavado el año 2016.

Mes	Año	$F_{lavado,dura}$ [l]
Enero	2016	94.161
Febrero	2016	34.717
Marzo	2016	112.173
Abril	2016	116.171
Mayo	2016	84.343
Junio	2016	63.238
Julio	2016	126.309
Agosto	2016	146.909
Septiembre	2016	172.414
Octubre	2016	198.617
Noviembre	2016	149.392
Diciembre	2016	102.322
Total 2016		1.400.766

Tabla 16: Consumo de agua dura utilizada para lavado el año 2017.

Mes	Año	$F_{lavado,dura}$ [L]
Enero	2017	122.429
Febrero	2017	103.475
Marzo	2017	143.851
Abril	2017	171.622
Mayo	2017	161.959
Junio	2017	129.784
Julio	2017	134.047
Agosto	2017	196.936
Septiembre	2017	126.829
Octubre	2017	218.054
Noviembre	2017	160.605
Diciembre	2017	148.678
Total 2017		1.818.269

iii. Agua total utilizada en lavado

Para el cálculo del agua total utilizada en lavado, se suman tanto el agua de osmosis de las Tablas 13 y 14 como el agua dura de las Tablas 15 y 16.

$$A_{t,a} = F_{lavado,osmosis} + F_{lavado,dura} \quad (\text{B-3})$$

Donde:

$A_{t,a}$: consumo total de agua para lavado en el mes t del año a .

Con esto, se define el rendimiento del uso de agua para lavado mensual y anual, respectivamente, como:

$$R_{w,t} = \frac{A_{t,a}}{P_{t,a}} \quad (\text{B-4})$$

$$R_{w,a} = \frac{\sum_t A_{t,a}}{\sum_t P_{t,a}} \quad (\text{B-5})$$

Por ejemplo, para el mes de febrero de 2016 se tiene que:

$$A_{febrero,2016} = 51.432 + 34.717 = 86149 [l] \quad (B-6)$$

$$R_{w,febrero} = \frac{86.149 [l \text{ agua}]}{869,07 [t \text{ producto}]} = 99,13 \left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right] \quad (B-7)$$

Y el rendimiento anual para el año 2016 se calcula:

$$R_{w,2016} = \frac{2.724.234 [l \text{ agua}]}{11.945,92 [t \text{ producto}]} = 228,05 \left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right] \quad (B-8)$$

Las Tablas 17 y 18 muestran el agua total utilizada para lavado y los respectivos rendimientos mensuales y anuales.

Tabla 17: Consumo total de agua para lavado y rendimientos para el año 2016.

Mes	Año	$A_{t,a}$ [l]	$P_{t,a}$ [t]	R_w $\left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right]$
Enero	2016	131.008	665,25	196,93
Febrero	2016	99.149	869,07	114,09
Marzo	2016	176.903	1068,57	165,55
Abril	2016	190.349	1096,82	173,55
Mayo	2016	236.616	923,15	256,31
Junio	2016	124.823	898,03	139,00
Julio	2016	230.787	916,05	251,94
Agosto	2016	265.284	1065,32	249,02
Septiembre	2016	289.418	984,61	293,94
Octubre	2016	334.553	1181,12	283,25
Noviembre	2016	448.693	1367,33	328,15
Diciembre	2016	214.651	910,60	235,73
Total 2016		2.724.234	11.945,92	228,05

Tabla 18: Consumo total de agua para lavado y rendimientos para el año 2017.

Mes	Año	$A_{t,a}$ [l]	$P_{t,a}$ [t]	R_w $\left[\frac{l \text{ agua}}{t \text{ producto}} \right]$
Enero	2017	212.341	1400,40	151,63
Febrero	2017	150.351	1060,17	141,82
Marzo	2017	234.642	1308,69	179,30
Abril	2017	231.868	1653,32	140,24
Mayo	2017	326.690	1545,97	211,32
Junio	2017	246.085	1278,13	192,54
Julio	2017	143.412	1523,57	94,13
Agosto	2017	355.880	1773,92	200,62
Septiembre	2017	170.939	916,47	186,52
Octubre	2017	295.174	1531,37	192,75
Noviembre	2017	332.475	1549,00	214,64
Diciembre	2017	250.138	1430,67	174,84
Total 2017		3.001.995	16.971,68	176,88

Anexo C: datos de medición de vapor de agua

Las Tablas 19 y 20 muestran las lecturas del medidor de vapor que se encuentra en la sala de caldera. La lectura inicial, correspondiente al mes de diciembre de 2015 fue de 6112,04 [t]. El cálculo del vapor utilizado fue realizado mediante la diferencia entre las lecturas de dos meses consecutivos, y se muestra en la ecuación (C-1):

$$V_{t,a} = l_t - l_{t-1} \quad (C-1)$$

Donde:

$V_{t,a}$: vapor utilizado en el mes t del año a [t].

$l_{t,a}$: lectura del medidor en el mes t del año a [t].

l_{t-1} : lectura del medidor en el mes anterior a t [t].

Además, de forma de normalizar los usos del agua, se define el rendimiento mensual $R_{v,t}$ en la ecuación (C-2):

$$R_{v,t} = \frac{V_{t,a}}{P_{t,a}} \cdot 1.000 \quad (C-2)$$

Donde:

$R_{v,t}$: rendimiento del vapor en el mes t $\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$.

$P_{t,a}$: Producción en el mes t del año a [t].

Tabla 19: Mediciones del vapor utilizado en producción OMS, año 2016.

Mes	Año	l_t [t]	$V_{t,a}$ [t]	$P_{t,a}$ [t]	R_v $\left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right]$
Enero	2016	6.144,45	32,41	665,25	48,7
Febrero	2016	6.234	89,55	869,07	103,0
Marzo	2016	6.302,69	68,69	1.068,57	64,3
Abril	2016	6.377,93	75,24	1.096,82	68,6
Mayo	2016	6.491,3	113,37	923,15	122,8
Junio	2016	6.569,96	78,66	898,03	87,6
Julio	2016	6.632,19	62,23	916,05	67,9
Agosto	2016	6.716,72	84,53	1.065,32	79,3
Septiembre	2016	6.777,4	60,68	984,61	61,6
Octubre	2016	6.875,4	98	1.181,12	83,0
Noviembre	2016	6.983,76	108,36	1.367,33	79,2
Diciembre	2016	7.049,96	66,2	910,60	72,7
Total 2016			937,92	11.945,92	78,51

Tabla 20: Mediciones del vapor utilizado en producción OMS, año 2017.

Mes	Año	l_t [t]	$V_{t,a}$ [t]	$P_{t,a}$ [t]	R_v [$\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}}$]
Enero	2017	7.101,65	51,69	1.400,40	36,9
Febrero	2017	7.162,28	60,63	1.060,17	57,2
Marzo	2017	7.232,42	70,14	1.308,69	53,6
Abril	2017	7.273,67	41,25	1.653,32	24,9
Mayo	2017	7.358,12	84,45	1.545,97	54,6
Junio	2017	7.394,94	76,60*	1.278,13	59,9
Julio	2017	7.502,16	67,44*	1.523,57	44,3
Agosto	2017	7.556,69	54,53	1.773,92	30,7
Septiembre	2017	7.657,47	100,78	916,47	110,0
Octubre	2017	7.782,03	124,56	1.531,37	81,3
Noviembre	2017	7.892,86	110,83	1.549,00	71,5
Diciembre	2017	7.974,8	81,94	1.430,67	57,3
Total 2017			924,84	16.971,68	54,49

*El vapor utilizado en los meses de junio y julio de 2017 fue estimado, ya que no se poseían datos del medidor en los fines del mes. El detalle del cálculo se encuentra en el Anexo D.

El cálculo de los rendimientos anuales se realiza con el consumo total del vapor del año y la producción anual, en la ecuación (C-3):

$$R_{v,a} = \frac{\sum_t V_{t,a}}{\sum_t P_{t,a}} \cdot 1.000 \quad (\text{C-3})$$

Donde:

$R_{v,a}$: rendimiento del vapor en el año a [$\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}}$].

Por ejemplo, para el mes de febrero de 2017 se tienen los siguientes valores para el uso del vapor:

$$V_{febrero,2017} = 7.162,28 - 7.101,65 = 60,63[t] \quad (\text{C-4})$$

Con esto, el rendimiento para ese mes es:

$$R_{v,febrero} = \frac{60,63[ton \text{ vapor}]}{1.060,17 [t \text{ producto}]} \cdot 1.000 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ vapor}} \right] = 57,2 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right] \quad (\text{C-5})$$

Finalmente, para el año 2017 se tiene que el rendimiento del uso del vapor es el siguiente:

$$R_{v,2017} = \frac{924,84 [ton \text{ vapor}]}{16.971[t \text{ producto}]} \cdot 1000 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ vapor}} \right] = 54,49 \left[\frac{kg \text{ vapor}}{t \text{ producto}} \right] \quad (\text{C-6})$$

Anexo D: cálculo de las estimaciones del uso de vapor

Para la estimación del uso del vapor en los meses en que no se tiene datos de fin de mes, se utilizaron aquellos de fechas intermedias. En la Tabla 21 se muestra la medición obtenida y la cantidad de días que representa, además del mes anterior y posterior al período considerado.

Tabla 21: Mediciones vapor utilizado en producción (no corregido).

Mes	Año	Lectura [t]	Consumo inicial [t]	Días considerados
Mayo	2017	7358,12	84,45	33
Junio	2017	7394,94	36,82	13
Julio	2017	7502,16	107,22	43
Agosto	2017	7556,69	54,53	27

Considerando los meses de junio y julio, se tiene que hay un consumo de 144,04 [t] de vapor que debe repartirse en 56 días.

Se asumirá que el uso diario promedio de vapor es aquel que puede calcularse con los datos de la tabla:

$$uso\ diario_{junio} = \frac{36,82}{13} = 2,83 \left[\frac{t}{dia} \right] \quad (D-1)$$

$$uso\ diario_{julio} = \frac{107,22}{43} = 2,49 \left[\frac{t}{dia} \right] \quad (D-2)$$

Considerando que cada mes de la medición posee 28 días, y utilizando las ecuaciones (D-1) y (D-2) se tiene un uso mensual de:

$$uso\ mensual_{junio} = 2,83 \left[\frac{t}{dia} \right] \cdot 28 [dias] = 79,30 [t] \quad (D-3)$$

$$uso\ mensual_{julio} = 2,49 \left[\frac{t}{dia} \right] \cdot 28 [dias] = 69,82 [t] \quad (D-4)$$

Finalmente, para normalizar los consumos y que sumen las 144,04 [t] que deben completarse, los resultados de (D-3) y (D-4) se multiplican por el factor

$$\alpha = \frac{144,04}{149,12} = 0,966 \quad (D-5)$$

Con esto, los consumos corregidos son los siguientes:

$$\text{uso corregido mensual}_{\text{junio}} = 76,60 [t] \quad (\text{D-6})$$

$$\text{uso corregido mensual}_{\text{julio}} = 67,44 [t] \quad (\text{D-7})$$

Anexo E: Cálculo de emisiones de dióxido de carbono

Para el cálculo de emisiones de dióxido de carbono, se considerará la estequiometría de la Ecuación (1), en la que se puede establecer que la relación entre la masa de gas que reacciona y la masa de CO₂ que se genera producto de la combustión. [32]

$$\frac{m_{CO_2}}{m_{CH_4}} = \frac{(12,01 + 16 \cdot 2)}{(12,01 + 4 \cdot 1)} = \frac{44,01}{16,01} = 2,75 \left[\frac{tCO_2}{tCH_4} \right] \quad (E-1)$$

Como sólo se tiene el volumen de gas en los medidores, debe utilizarse la densidad para obtener la masa [33]. Con esto, y la razón de la Ecuación (Y), se tiene que la masa de CO₂ que se produce es:

$$\begin{aligned} 327.015 [m^3 CH_4] \cdot 0,667 \left[\frac{kg CH_4}{m^3 CH_4} \right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{t CH_4}{kg CH_4} \right] \cdot 2,75 \left[\frac{tCO_2}{tCH_4} \right] \\ = 599,83 [t CO_2] \end{aligned} \quad (E-2)$$

Ahora, normalizando las emisiones por la producción del 2017 (Anexo C) se tiene que las emisiones por tonelada de producto fabricado quedan:

$$F_{EI} = \frac{599,83 [t CO_2]}{16.971,68 [t producto]} \cdot 1.000 \left[\frac{kg CO_2}{t CO_2} \right] = 35,34 \left[\frac{kg CO_2}{t producto} \right] \quad (E-3)$$

De forma análoga, puedo obtenerse para los años anteriores. La Tabla 22 resume ambos resultados.

Tabla 22: Rendimiento de emisiones de dióxido de carbono entre los años 2013 y 2017.

Año	Dióxido de carbono producido [t]	Producción [t]	Rendimiento $\left[\frac{kg CO_2}{t producto} \right]$
2013	570,57	11.402	50,04
2014	621,79	12.268	50,68
2015	594,56	11.953	49,74
2016	659,49	11.945	55,21
2017	599,83	16.971	35,34

Anexo F: información de la caldera

i. Eficiencia caldera

Para obtener el rendimiento de la caldera, se tomaron los datos de producción de vapor de agua y consumo de metano de cada mes del año 2016. Con esto se obtuvo la eficiencia mensual del equipo. (Figura 24). Esto da como resultado una eficiencia energética anual del 70%. [31]

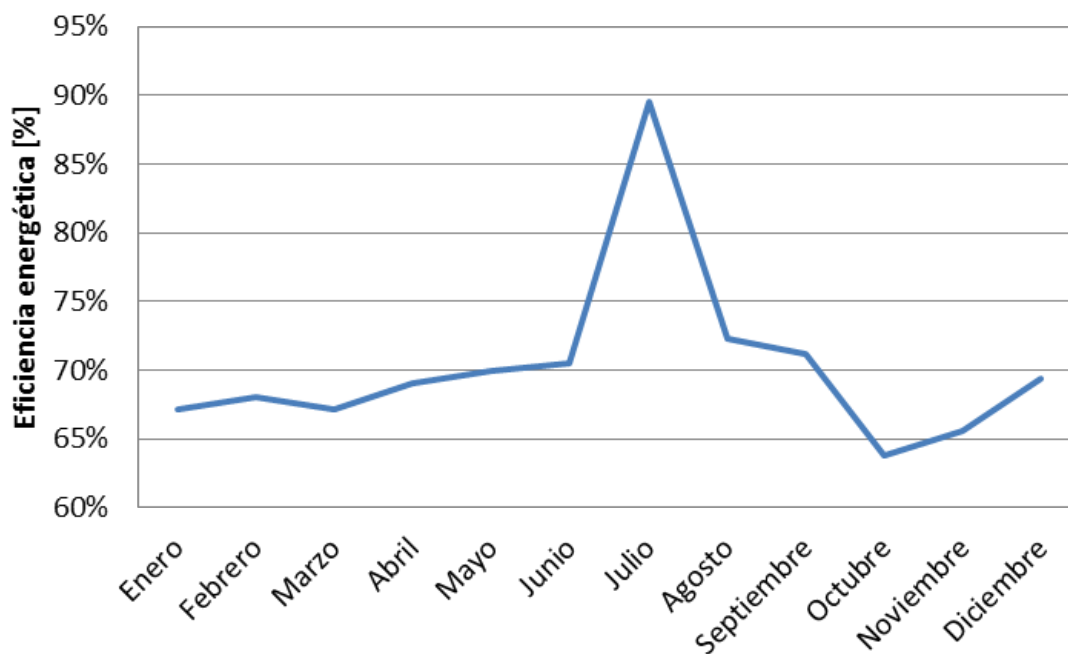


Figura 24: Eficiencia energética de la caldera. Fuente: datos propios empresa.

ii. Consumo de gas natural

La Tabla 23 muestra el consumo mensual de gas natural durante el 2017, y el total anual. La Tabla 24 muestra los consumos de gas natural de los años 2014, 2015 y 2016.

Tabla 23: Consumo de gas y vapor producido, año 2017.

Mes	Volumen de gas [m ³]
Enero	13.975
Febrero	24.562
Marzo	24.824
Abril	28.223
Mayo	30.513
Junio	29.382
Julio	29.263
Agosto	34.644
Septiembre	30.522
Octubre	32.854
Noviembre	22.518
Diciembre	25.735
Anual 2017	327.015

Tabla 24: Volumen de metano consumido en la caldera.

Año	Metano consumido [m ³]
2013	311.067
2014	338.991
2015	324.141
2016	359.542

Anexo G: cálculo de energía

Para el cálculo de la energía asociada a la producción de vapor, debe considerarse la masa de este producida, el calor latente del proceso de evaporación de agua de la Ecuación (2) y la eficiencia de la caldera. La Tabla 25 muestra los consumos totales de vapor de agua de la planta en el período 2013-2017.

Tabla 25: Uso anual de vapor en la planta.

Año	Vapor utilizado [t]
2013	993,00
2014	760,20
2015	1034,7
2016	937,92
2017	924,84

Para el cálculo de la energía, se sigue la ecuación de calor para cambios físicos [33], considerando la eficiencia de la caldera:

$$E = \frac{\lambda \cdot V_a}{\eta_c} \quad (\text{G-1})$$

Donde:

V_a : masa de vapor utilizada en el año a [t].

η_c : Eficiencia de la caldera [].

Por ejemplo, para el año 2017 se tiene que:

$$E = \frac{2.261,45 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \cdot 924,84[t]}{0,7} \cdot \frac{1000 \left[\frac{kg}{t} \right]}{1} = 2.987,23[GJ] \quad (\text{G-2})$$

Con esto, se calcula de forma análoga la energía de cada año, con sus respectivos rendimientos, normalizando por la producción del período (Tabla 26).

Tabla 26: Consumo y rendimiento de energía producto del vapor.

Año	Energía [GJ]	Producción [t]	Rendimiento Energía $\left[\frac{MJ}{t \text{ producto}} \right]$
2013	3.207,39	11.402	281,30
2014	2.455,45	12.268	200,15
2015	3.342,08	11.953	279,60
2016	3.029,48	11.945	253,62
2017	2.987,23	16.971	176,02

Anexo H: lista de procesos de limpieza a estandarizar

Las Tablas 27 y 28 muestran los procesos de limpieza que se realizan en cada reactor a partir de la información obtenida en las matrices de limpieza del Anexo K. En ella se indica si el procedimiento requiere el uso de vapor o agua de lavado, el código de la Instrucción de Trabajo (si está creada), la fecha en que fue actualizado el documento o si no está elaborado o finalizado.

Tabla 27: Estado de estandarización de procedimientos de limpieza.

Equipo	Proceso	Insumo		Código Instrucción de trabajo	Fecha revisado
		Agua	Vapor		
R-500	Enjuagado con agua fría	X		WI_48	13 febrero 2018
	Lavado con agua caliente	X	X	WI_49, WI_50, WI_51	13 febrero 2018
	Vaporizado y enjuagado	X	X	WI_53	21 febrero 2018
	Enjuagar, vaporizar y enjuagar	X	X		Por elaborar
R-520	Enjuagado con agua fría	X		WI_55	15 febrero 2018
	Lavado con agua caliente	X	X	WI_56 WI_57	20 febrero 2018
	Vaporizado y enjuagado	X	X	WI_59	20 febrero 2018
B-524	Enjuagado con agua fría	X			Por elaborar
	Enjuagado con agua caliente	X	X	WI_44	13 febrero 2018
	Lavado con agua caliente	X	X	WI_46	13 febrero 2018
	Lavado especial	X	X	WI_47	13 febrero 2018
R-600	Enjuagado con agua fría	X			Por elaborar
	Enjuagado con agua caliente	X	X	WI_60	14 febrero 2018
	Urraqueado	X		WI_62	14 febrero 2018
	Lavado con agua caliente	X	X	WI_60	Por finalizar
	Lavado especial	X	X	WI_63	Por finalizar

Tabla 28: Estado de estandarización de procedimientos de limpieza (continuación)

Equipo	Proceso	Insumo		Código Instrucción de trabajo	Fecha revisado
		Agua	Vapor		
R-610	Urraqueado	X		WI_67	Por finalizar
	Lavado especial	X	X	WI_66	Por finalizar
	Vaporizado y enjuagado	X	X	WI_68	Por finalizar
	Enjuagar, vaporizar y enjuagar	X	X		Por elaborar
R-735	Enjuagado con agua fría	X		WI_69	Por finalizar
	Enjuagado con agua caliente	X	X		Por elaborar
	Lavado con agua caliente	X	X	WI_71	Por finalizar
	Lavado especial	X	X		Por elaborar
	Vaporizado y enjuagado	X	X		Por elaborar
Camión	Vaporizado		X		Por elaborar

Anexo J: propuesta de documento de auditoría a procedimientos de limpieza

Tabla 30: Propuesta de documento de auditoría a procedimientos de limpieza

Auditoría procedimientos de limpieza Planta OMS						
Reactor:				Procedimiento a auditar:		
Nombre auditor:				Fecha:		
Primera parte: Registro auditoría anterior						
Esta sección debe ser completada por el auditor mediante la revisión de auditorías anteriores. Estos documentos los posee el Ingeniero de Procesos de la Planta.						
Código Work Intruction (WI):				Fecha última auditoría:		
¿Se propusieron cambios en auditoría anterior?	Sí	No	¿Fueron implementados?	Si	No	Parcialmente
Reporte los cambios que no se implementaron y las razones						
1. _____						
2. _____						
3. _____						
Segunda parte: observación limpieza y cumplimiento receta.						
Esta sección se completa mediante preguntas al operador del reactor, jefe de turno y observaciones del procedimiento que se realiza.						
Orden	Pregunta/observación			Respuesta u observaciones		
1	¿Conoce la receta de lavado del procedimiento que está realizando?			Sí	No	Obs:
2	¿Reporta el lavado cuando lo realiza?			Sí	No	Obs:
3	¿Completa, o sabe completar el documento KPI de agua de lavado?			Sí	No	Obs:
4	¿Detecta algún problema en el procedimiento de lavado, o algo que dificulte su realización?					
5	¿De qué manera mejoraría el procedimiento de lavado que actualmente realiza en el reactor?					
6	Complete el volumen (en metros cúbicos) estándar de lavado y el registrado en la observación			Volumen estándar:		Volumen observado:
Tercera parte: medidas a aplicar						
Con la información disponible, realice un análisis de posibles acciones a seguir para controlar o disminuir el consumo de agua de lavado. Explícite si modificará o no el Work Intruction.						

Firma auditor:

Firma Jefe producción:

Anexo K: matrices para limpieza de reactores

La Tabla 31 posee la identificación de los procesos de limpieza de los reactores con su respectiva numeración, la que será utilizada para la construcción de las matrices.

Las Tablas 32, 33, 34, 35, 36 y 37 corresponden a las matrices que muestran el procedimiento de limpieza que debe realizarse dado un producto terminado y uno que se va a elaborar, para todos los reactores operativos de la planta. Es así, por ejemplo, que si desea fabricarse el producto KO9 luego de producir el AO5 en el tanque R-500, debe realizarse un lavado con agua caliente.

Para la construcción de las matrices, se utilizaron los productos más comunes que se fabrican en cada reactor. Sin embargo, los productos pueden fabricarse en otro de los estanques, por lo que la relación es igualmente válida.

Los nombres de los productos fueron reemplazados por códigos característicos para conservar la confidencialidad de los procesos productivos.

Tabla 31: Identificación de procesos de limpieza de reactores.

Nº	Proceso de lavado
0	Proseguir con fabricación
1	Enjuagado con agua fría
2	Enjuagado con agua caliente
3	Urraqueado
4	Lavado con agua caliente
5	Lavado especial
6	Vaporizado y enjuagado
7	Enjuagado, vaporizado y enjuagado

Tabla 32: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-500.

Reactor R-500		Producto a Elaborar										
		K09	J01	A01	A02	A03	A04	A05	B01	B02	H01	K01
Producto Terminado	K09	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
	J01	6	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	A01	6	6	0	1	1	1	1	6	6	6	6
	A02	4	4	1	0	1	1	6	4	4	4	4
	A03	6	6	1	1	0	1	6	6	6	6	6
	A04	6	6	1	1	1	0	1	6	6	6	6
	A05	4	4	6	6	6	6	0	4	4	4	4
	B01	7	7	7	7	7	7	7	0	0	7	7
	B02	7	7	7	7	7	7	7	0	0	7	7
	H01	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6
K01	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	

Tabla 33: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-520.

Reactor R-520		Producto a Elaborar								
		C01	C02	K02	K03	J02	G05	K04	H02	H03
Producto Terminado	C01	1	1	4	1	4	4	4	4	4
	C02	1	1	4	1	4	4	4	4	4
	K02	6	6	0	6	6	6	6	6	6
	K03	4	4	4	0	4	4	4	4	4
	J02	6	6	6	6	0	6	6	6	6
	G05	6	6	6	6	6	1	6	6	6
	K04	4	4	4	4	4	4	0	4	4
	H02	4	4	4	4	4	4	4	0	0
	H03	4	4	4	4	4	4	4	0	0

Tabla 34: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor B-524.

Reactor B-524		Producto a Elaborar																
		K05	G01	G02	G03	A06	A07	A08	A03	A09	A10	A11	A12	D01	D02	K06	A18	K10
Producto Terminado	K05	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	G01	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	G02	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	G03	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	A06	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	A07	2	2	2	2	2	0	0	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2
	A08	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	A03	2	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
	A09	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2
	A10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2
	A11	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2
	A12	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	2	2	2	2	2
	D01	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	4	5	5
	D02	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	4	5	5
	K06	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	-	-
	A18	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	-	0	2
K10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	

Tabla 35: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-600.

Reactor R-600		Producto a Elaborar									
		E01	E02	E03	K07	G04	F01	F02	E04	D02	A19
Producto Terminado	E01	0	0	0	5	5	5	5	5	5	0
	E02	0	0	0	5	5	5	5	5	5	0
	E03	0	0	0	5	5	5	5	5	5	0
	K07	2	2	2	0	2	2	2	2	2	4
	G04	3	3	3	3	0	3	3	3	3	2
	F01	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2
	F02	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2
	E04	4	4	4	4	4	4	4	0	4	4
	D02	4	4	4	4	4	4	4	4	0	5
	A19	0	0	0	5	5	5	5	2	2	0

Tabla 36: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-610.

Reactor R-610		Producto a Elaborar												
		K08	A17	J02	A13	A05	A14	A15	A03	A01	A16	B01	B02	A20
Producto Terminado	K08	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	A17	6	0	6	6	6	6	6	6	6	3	6	6	0
	J02	6	6	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	A13	6	6	4	0	0	0	0	6	3	3	6	6	0
	A05	6	6	4	0	0	0	0	6	3	3	6	6	0
	A14	6	6	4	0	0	0	0	6	3	3	6	6	0
	A15	6	6	4	0	0	0	0	6	3	3	6	6	0
	A03	6	3	6	3	3	3	3	0	3	3	6	6	0
	A01	6	3	6	3	3	3	3	3	0	3	6	6	0
	A16	6	3	6	3	3	3	3	3	3	0	6	6	0
	B01	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0	0	5
	B02	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0	5
	A20	6	0	7	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0

Tabla 37: Matriz de identificación de proceso de limpieza para el reactor R-735.

Reactor R-735		Producto a Elaborar									
		J02	D02	G04	K07	E02	E03	E05	F02	F02	A21
Producto Terminado	J02	0	1	1	1	1	1	6	6	6	6
	D02	4	0	4	4	4	4	5	5	5	5
	G04	1	1	0	1	1	1	5	5	2	2
	K07	2	2	2	0	2	2	5	5	2	2
	E02	5	5	5	5	0	0	5	5	0	0
	E03	5	5	5	5	0	0	5	5	0	0
	E05	5	5	5	5	2	2	0	0	2	2
	F02	5	5	5	5	4	2	0	0	2	2
	F02	5	5	5	5	0	0	5	5	0	0
	A21	5	2	2	2	0	0	5	5	0	0

Anexo L: método de estimación de consumo semanal de agua dura de lavado

Para realizar la estimación del uso del agua de lavado, se requiere conocer el volumen de agua que se utiliza en cada procedimiento de lavado, para cada reactor (Tabla 38). Adicionalmente, es necesario contar con la planificación semanal de producción. Con esto, se puede determinar qué tipo de lavado se realizará en cada uno de los reactores y calcular el volumen de agua que se utilizará diariamente. También se considerará un consumo base diario de 500 litros de agua para el lavado de mangueras y equipos auxiliares.

La Tabla 39 es una representación real de la planificación de la producción de una semana del mes de diciembre de 2017.

Tabla 38: Volumen de agua utilizado en los procedimientos de limpieza.

	Proseguir con fabricación	Enjuagado con agua fría	Enjuagado con agua caliente	Urraqueado	Lavado agua caliente	Lavado especial	Vaporizado y enjuagado	Enjuagado, vaporizado, enjuagado
Reactor	0	1	2	3	4	5	6	7
R-500	0	1	3	0,2	16	16	0	1
R-520	0	0,5	1	0,1	6	6	0	0,5
B-524	0	0,3	1	0,1	11	11	0,25	0,55
R-600	0	0,4	1	0,1	5	5	0,35	0,75
R-610	0	0,2	1	0,1	8	8	0,2	0,4
R-735	0	0,3	1	0,1	10	10	0	0,3

Tabla 39: Planificación semanal 18 a 24 de diciembre, 2017 (adaptación).

	Lunes			Martes			Miércoles			Jueves			Viernes			Sábado		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
R-735		F03			K07					E02			E02			E05		
R-600	E02			E02			E02		A19	A19	A19	A19	A19		A19			
R-610	A17	A17	A17				A20		A20				J02		J02		J02	
R-500		J01		J01			J01			J01			J01			J01		
R-520	C02	C02	C02				C02		C02		C02			K02	K02	K02		
B-524		A18	A18				K10	K10	K10	K10			D02		D02			

Con los datos de la programación y el tipo de lavado determinado en el Anexo I, se puede determinar el procedimiento que se realizará en cada turno de la semana. La Tabla 40 muestra la planilla que debe llenar un operador o jefe de turno para obtener la estimación de agua a utilizar para el período siguiente. Al llenarse la Tabla 40, automáticamente se completa la Tabla 41, que contiene los datos para la estimación. Cuando no existen lavados programados para el turno, se considerará un consumo base de $0,5 [m^3]$ para limpieza de cañerías y pérdidas. Si existiesen, se suma solamente $0,3 [m^3]$ como consumo base.

Finalmente, se genera un gráfico con el consumo teórico y la meta semanal (Figura 25).

Tabla 40: Tabla de ingreso de lavados programados para la semana del 18 de diciembre, en base a la programación.

	Lunes			Martes			Miércoles			Jueves			Viernes			Sábado	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B
R-735				0	0	2		0				0		0			
R-600			0			0		0		0	0	0	0	0			
R-610		0				0		0	7		0	0	0	0			
R-500				0			0		0			0		0			
R-520		0		0		0		0		0			4	0	0		
B-524			0		2		0	0	0	2					0		

Tabla 41: Volumen estimado para cada procedimiento de lavado programado.

	Lunes			Martes			Miércoles			Jueves			Viernes			Sábado	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B
R-735	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R-600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R-610	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0	0	0	0	0	0	0	0
R-500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R-520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
B-524	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	0	1	3	0	0	0,55	1	0	0	8	0	0	0	0
	0,5	0,5	0,5	0,5	1,3	3,3	0,5	0,5	0,85	1,3	0,5	0,5	8,3	0,5	0,5	0,5	0,5

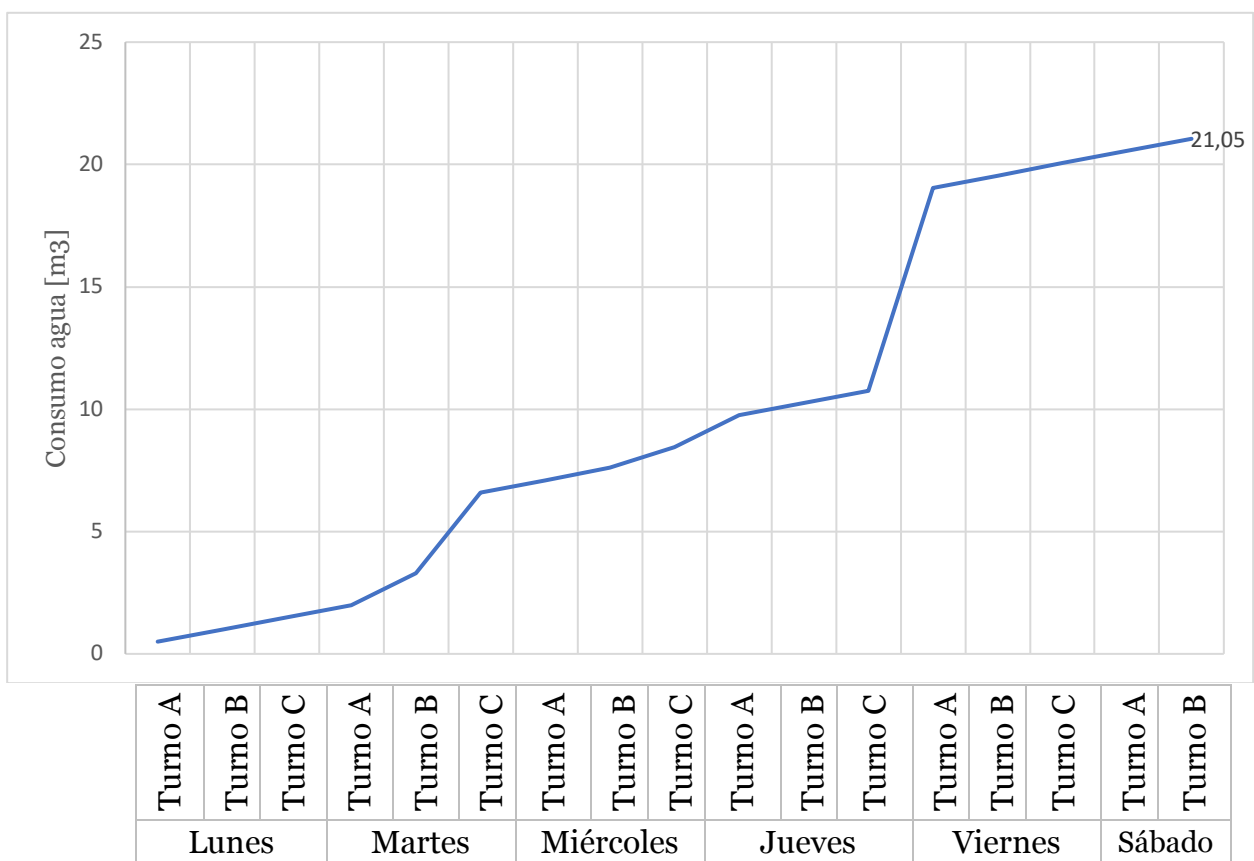


Figura 25: Gráfico de estimación de consumo de agua de lavado y meta semanal.

Anexo M: prueba de estimaciones de metas de consumo de agua de lavado

Las Figuras 26, 27, 28, 29 y 30 muestran la curva de Indicador de desempeño que actualmente se utiliza, la propuesta, y los datos reales medidos durante las 5 semanas de estudio, para cada turno de trabajo.

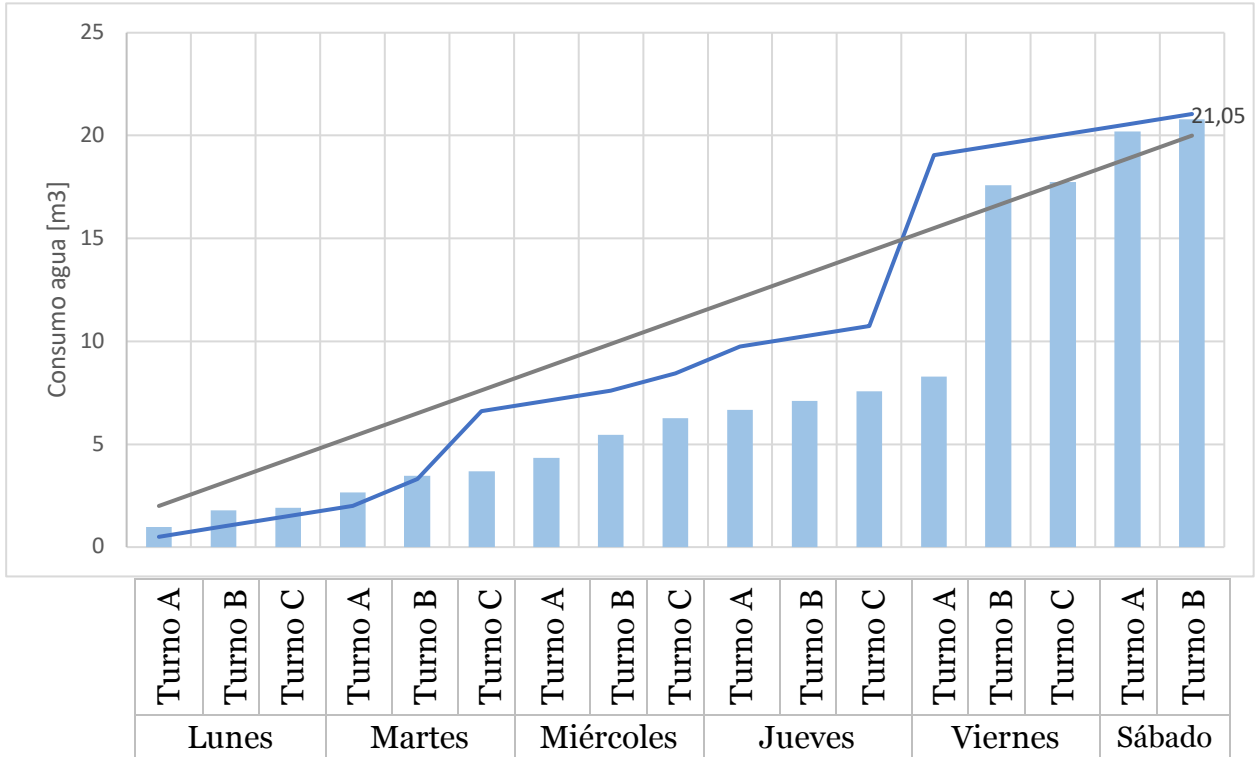


Figura 26: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 1.

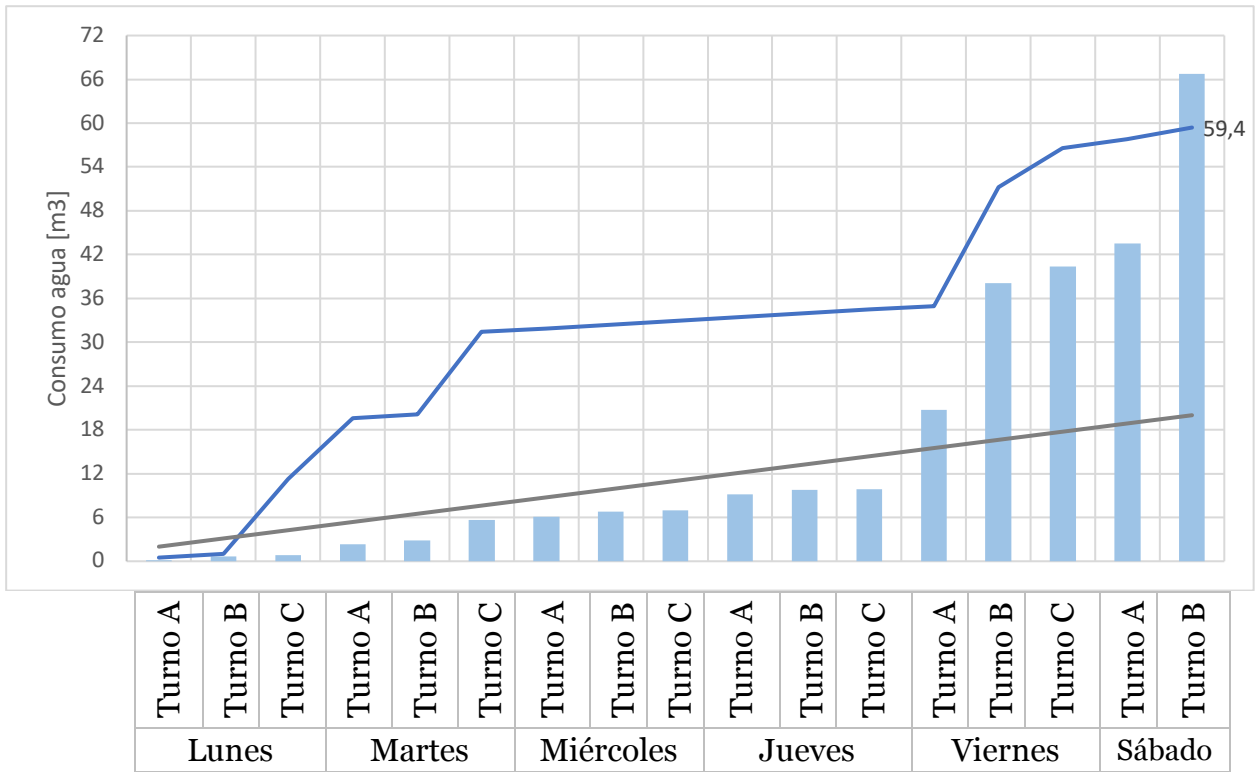


Figura 27: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 2.

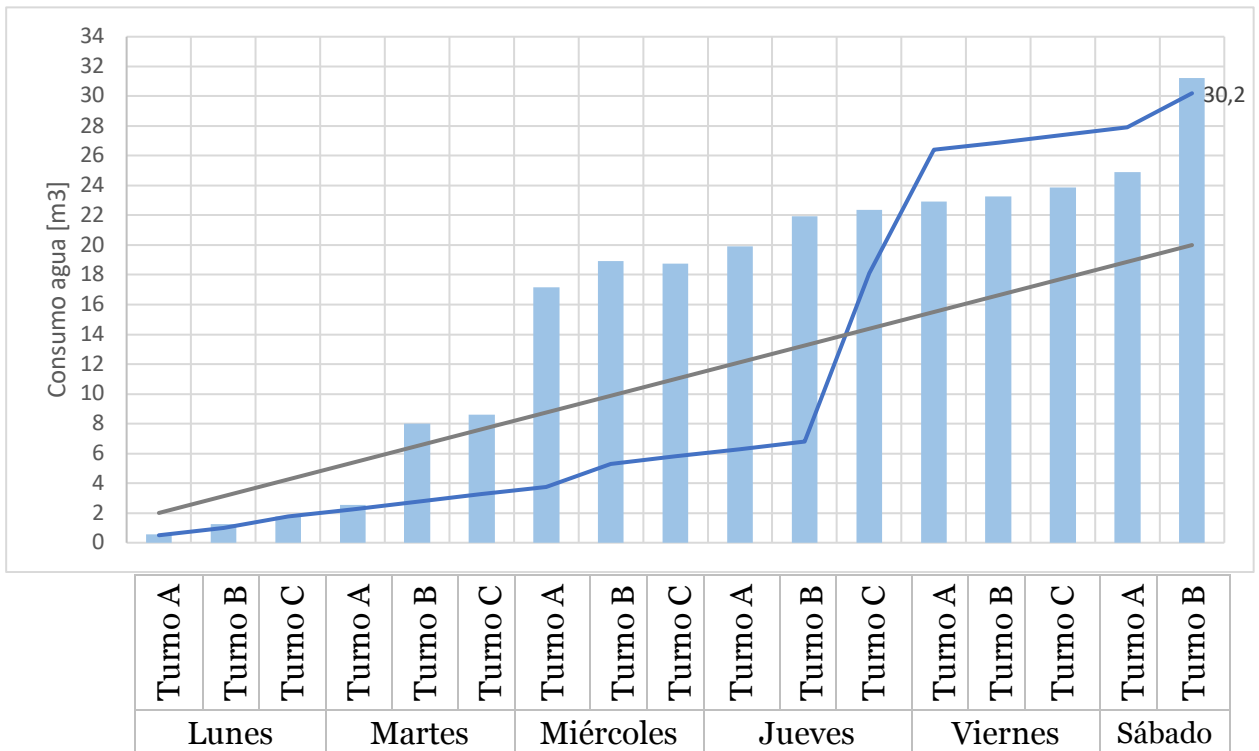


Figura 28: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 3.

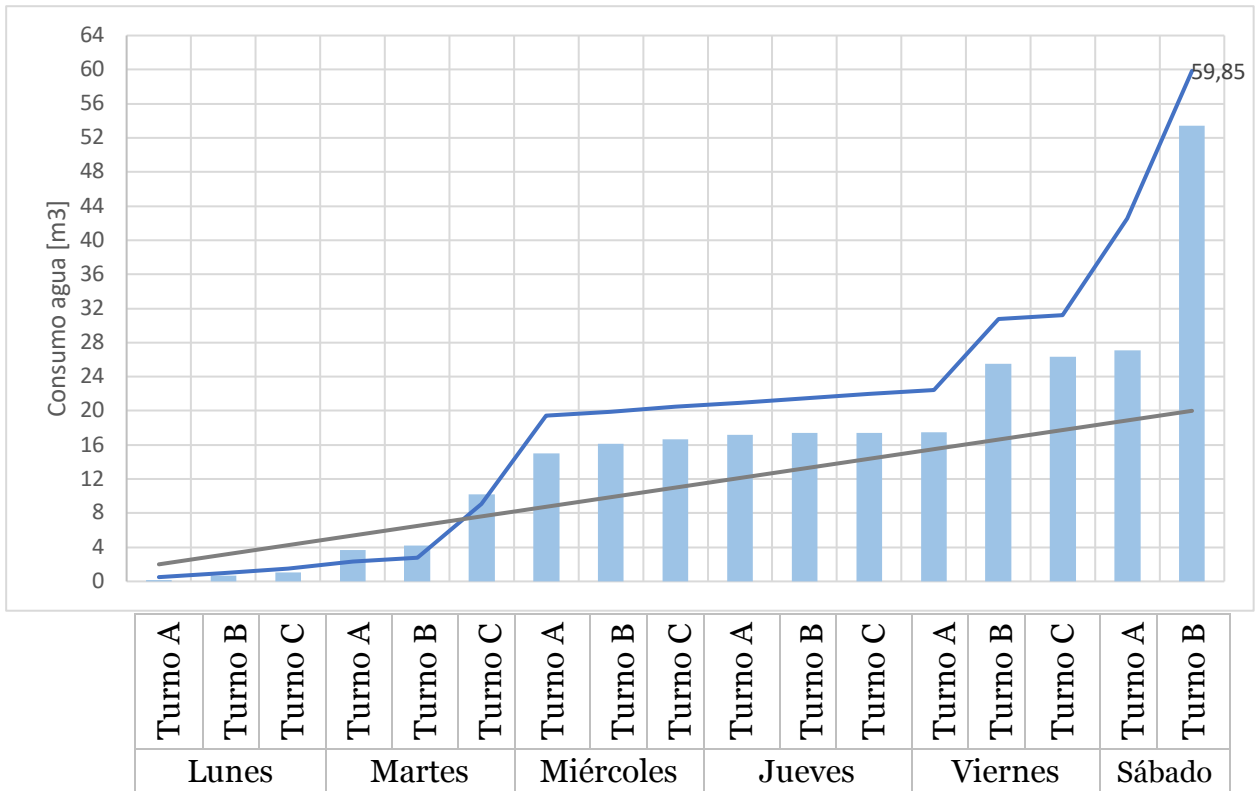


Figura 29: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 4.

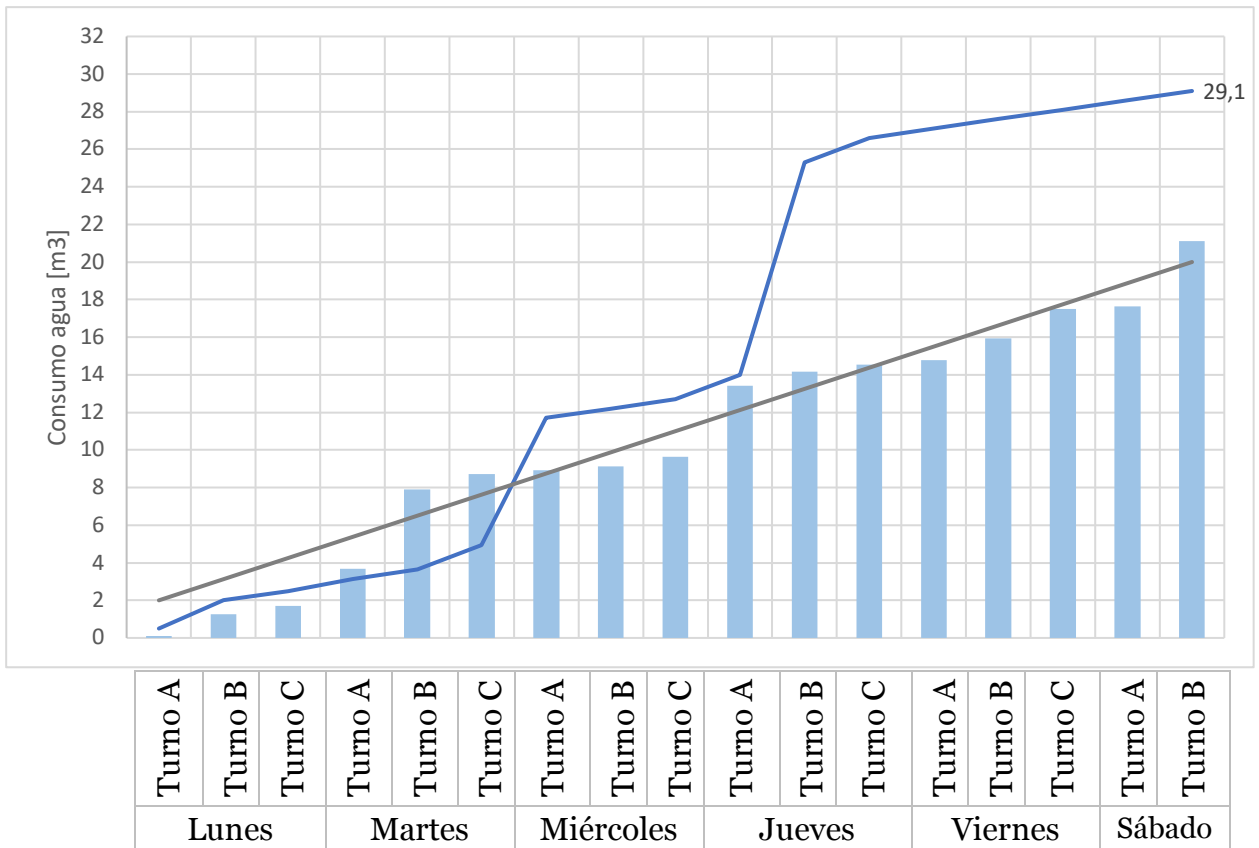


Figura 30: Consumo y meta de consumo de agua para la semana 5.

Anexo N: composición del aire

La Tabla 42 muestra la composición media de la atmósfera seca por debajo de los 80 km. [18]

Tabla 42: Composición del aire.

Componentes	Fórmula Química	Volumen % (aire seco)
Nitrógeno	N ₂	78,08
Oxígeno	O ₂	20,95
Argón	Ar	0,93
Dióxido de Carbono	CO ₂	350 ppmv
Neón	Ne	18,2 ppmv
Helio	He	5,24 ppmv
Metano	CH ₄	2 ppmv
Kriptón	Kr	1,1 ppmv
Hidrógeno	H ₂	0,5 ppmv
Óxido Nitroso	N ₂ O	0,3 ppmv
Xenón	Xe	0,08 ppmv
Monóxido de Carbono	CO	0,05 – 0,2 ppmv
Ozono	O ₃	0,02 – 0,03 ppmv